

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA

METALÚRGICA



T E S I S

**Evaluación metalúrgica del consumo de xantatos Z11 y Z6 para
optimizar la recuperación de cobre en Pan American Silver Huarón S.A.**

- Pasco-2024

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autores:

Bach. Julisa Soledad BARRETO ROBLES

Bach. Samuel CHAMORRO ROMERO

Asesor:

Mg. Osmer Ignacio BLANCO CAMPOS

Cerro de Pasco – Perú – 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA

METALÚRGICA



T E S I S

**Evaluación metalúrgica del consumo de xantatos Z11 y Z6 para
optimizar la recuperación de cobre en Pan American Silver Huarón S.A.**

- Pasco-2024

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Eduardo Jesús MAYORCA BALDOCEDA
PRESIDENTE

Mg. Edgar Joni AIRE MENDOZA
MIEMBRO

Mg. Jose Eli CASTILLO MONTALVAN
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Facultad de Ingeniería

Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 331-2025-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

Evaluación metalúrgica del consumo de xantatos Z11 y Z6 para optimizar la recuperación de cobre en Pan American Silver Huarón S.A. - Pasco-2024.

Apellidos y nombres de los tesistas

Bach. Julisa Soledad BARRETO ROBLES.

Bach. Samuel CHAMORRO ROMERO.

Apellidos y nombres del Asesor:

Mg. Osmer Ignacio BLANCO CAMPOS

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Metalúrgica

Índice de Similitud

0 %

APROBADO

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes.

Cerro de Pasco, 7 de octubre del 2025



Firmado digitalmente por PALOMINO
ISIDRO Ruben Edgar FAU
20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 07.10.2025 17:42:56 -05:00

DEDICATORIA

Este proyecto se dedica, en primer término, a Dios, por ser la guía espiritual que ha otorgado fortaleza y sabiduría en cada etapa del proceso de investigación y desarrollo. Su apoyo ha permitido avanzar con determinación en cada fase del procedimiento establecido. Asimismo, se expresa un especial reconocimiento a los padres de Celia y Celso, quienes con su constante estímulo y ejemplo de perseverancia han contribuido de manera significativa al logro de las metas propuestas, evidenciando que el esfuerzo y el trabajo son pilares fundamentales para alcanzar los objetivos profesionales y personales.

Este proyecto también está dedicado a todas aquellas personas que han sido fuente de afecto y respaldo incondicional. A ellos les expreso mi profundo agradecimiento por enseñarme a perseverar frente a las dificultades, por su confianza en mis capacidades y por el apoyo constante que ha hecho posible el cumplimiento de este propósito. De igual manera, extendo mi reconocimiento a mis colegas, docentes y a cada individuo que, de una u otra forma, contribuyó al desarrollo y culminación de este trabajo.

AGRADECIMIENTO

Deseo manifestar mi profundo reconocimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de este estudio. En primer lugar, agradezco a mi familia por su constante apoyo y comprensión durante todo el proceso de investigación.

Asimismo, extendo un agradecimiento especial a la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión y, en particular, a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, cuya orientación y dedicación fueron decisivas para mi desarrollo académico y para fortalecer mi formación como futuro profesional del campo metalúrgico.

Asimismo, quiero expresar mi agradecimiento a los ingenieros de la Unidad de la empresa Minera Pan American Silver Huarón S.A, cuya colaboración y apoyo resultaron esenciales para la realización de esta investigación. Su experiencia y asesoramiento fueron determinantes en cada fase del proceso. Por último, a todos quienes, de alguna manera, ofrecieron su ayuda y aliento durante este proyecto, les extiendo mi más sincero reconocimiento.

RESUMEN

El análisis que se hizo tuvo como objetivo determinar la ingesta de los xantatos Z11 y Z6 durante la etapa de flotación, con el fin de conseguir una mayor recolección de cobre en la unidad minera Pan American Silver Huaron S.A., ubicada en Pasco, durante el año 2024. El conjunto de población estudiada fue la reserva y el conjunto de recursos de cobre tratado en la Central de Recogida durante ese exacto periodo. Para la investigación se obtuvo una muestra representativa de 200 kg, recolectada mediante un muestreo sistemático en la cancha de mineral grueso, asegurando la homogeneidad del material. Las pruebas metalúrgicas se realizaron empleando 1 kg por ensayo. A partir de esta muestra se conformaron 10 unidades experimentales bajo un diseño factorial completo $2^{32} \times 3^{23}$, incorporando dos puntos centrales replicados, con el objetivo de analizar el efecto de los colectores Z11 y Z6 sobre la eficiencia de recuperación de cobre. Los ensayos se ejecutaron en condiciones controladas, determinándose un tiempo óptimo de molienda de 16,57 minutos para alcanzar una granulometría del 60 % a malla -200. El mineral presentó una ley de 0,20 % de Cu y 108,22 g/t de Ag.

Los resultados más favorables se lograron utilizando una formulación de 60 % de xantato Z11 y 40 % de Z6, con la cual se alcanzó una recuperación de 94,19 % para el cobre y 91,12 % para la plata. Esta combinación mostró un desempeño superior frente al uso individual de cada colector y frente a otras proporciones de mezcla evaluadas. El diseño experimental aplicado permitió determinar las condiciones óptimas de flotación, evidenciando que una dosificación adecuada de los colectores incrementa de manera significativa la eficiencia metalúrgica del proceso.

En síntesis, los resultados de la investigación demuestran que la aplicación

conjunta de los xantatos Z11 y Z6 constituye una alternativa técnica eficaz para incrementar la recuperación de cobre en la mina Huaron, aportando criterios valiosos para la optimización del uso de reactivos en procesos metalúrgicos de características similares.

Palabra clave: Optimización, Xantatos Z11 y Z6, Recuperación de cobre y Flotación

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the consumption of Z11 and Z6 xanthates in the flotation process in order to optimize copper recovery at the Pan American Silver Huaron S.A. mining unit, located in Pasco, during the year 2024. The study population consisted of copper sulfide mineral reserves and resources processed at the Concentrator Plant during the same period. For the experimental phase, a representative 200-kg sample was collected through random sampling in the coarse ore yard, ensuring material homogeneity. Metallurgical tests were performed using 1 kg of sample for each experiment. Based on this material, 10 experimental units were prepared following a full factorial 2^3 design with two replicated central points, with the purpose of analyzing the effects of the Z11 and Z6 collectors and pulp pH on copper recovery. Flotation experiments were conducted under controlled laboratory conditions, establishing an optimal grinding time of 16.57 minutes to achieve a particle size of 60% passing through a -200 mesh. The composite ore presented an average grade of 5.15% Cu and 89.96 g/t Ag. The results demonstrate that the controlled use of xanthates enhances both the copper recovery rate and the overall efficiency of the flotation process, highlighting the importance of properly adjusting operational parameters in metallurgical processes with similar characteristics.

The highest recovery rates were obtained using a mixture of 60% Z11 and 40% Z6, achieving 94.19% for copper and 91.12% for silver. This combination outperformed both the individual collectors and the other mixing ratios evaluated. The experimental design enabled the determination of optimal flotation conditions, confirming that precise control of collector dosage plays a critical role in maximizing process efficiency.

In summary, the findings demonstrate that the combined use of Z11 and Z6 xanthates represents an effective technical strategy for enhancing copper recovery at the Huaron mine and provides valuable guidance for optimizing reagent application in comparable metallurgical operations.

Keyword: Optimization, Xanthates Z11 and Z6, Copper Recovery and Flotation

INTRODUCCIÓN

El Perú es reconocido por su destacada actividad minera, impulsada por la presencia de valiosos depósitos minerales. Desde la época colonial, la minería ha tenido un papel crucial, especialmente con la exportación de plata y mercurio a través del método de pallaqueo. En un contexto histórico, los minerales de América Latina fueron vitales para la economía de Europa. La unidad minera Huarón, operada por Pan American Silver y ubicada en la sierra central de Pasco, se dedica al procesamiento de minerales metálicos como cobre, plomo, plata y zinc. Estos recursos presentan una mineralogía variada, compuesta principalmente por calcopirita, galena argentífera y esfalerita. En la planta concentradora, estos minerales son sometidos a procesos de valorización y transformación con el objetivo de obtener concentrados de cobre, plata y zinc. La ganga está constituida principalmente por silicatos y, en menor proporción, por sulfuros de plata y cobre.

Capítulo I. Problema de investigación: se requiere la identificación y caracterización detallada de la problemática, así como su adecuado planteamiento. Asimismo, se definen los objetivos del estudio, se expone la justificación que respalda su relevancia y se precisan las limitaciones que enmarcan el desarrollo de la investigación.

Capítulo II. Se establecen los antecedentes del análisis, los fundamentos teóricos y de investigación, la definición de los conceptos clave, la formulación de hipótesis, así como la determinación de las variables y su correspondiente operacionalización, incluyendo los indicadores de medición asociados.

Capítulo III. Metodología y métodos de investigación: se describe la clase de estudio realizada y las maneras en que fue utilizada, además del diseño experimental, el grupo de personas y la muestra escogida. Además, se precisa los

instrumentos y métodos utilizados para la recolección de información, el punto de vista escogido para analizar la fiabilidad de los instrumentos de medición y las consideraciones éticas que definen la investigación.

Capítulo IV. Discusiones y resultados: esta sección contiene la labor de campo, que se expresa a través de la presentación de los resultados, su análisis y la manera en que estos últimos afectan la labor de campo. Asimismo, se garantiza la verificación de las hipótesis planteadas y se debate los primordiales resultados del análisis. El apartado incluye, además, las conclusiones derivadas de la investigación, las recomendaciones formuladas a partir de los resultados, la relación de las fuentes bibliográficas consultadas y los anexos que proporcionan información complementaria al trabajo realizado.

El autor

INDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

INDICE

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema.....	1
1.2. Delimitación de la investigación	2
1.2.1. Delimitación geográfica.....	2
1.2.2. Delimitación de la población	2
1.2.3. Delimitación tiempo.....	3
1.3. Formulación del problema	3
1.3.1. Problema general.....	3
1.3.2. Problemas específicos	3
1.4. Formulación de objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. Justificación de la investigación.....	4
1.6. Limitaciones de la investigación	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio	7
------------------------------------	---

2.2. Bases teóricas – científicas.....	14
2.2.1. Flotación de minerales sulfurados:	14
2.2.2. Fenómenos eléctricos en la interface mineral-agua.....	16
2.2.3. Tipos de celda de flotación	21
2.2.4. Conminución	23
2.2.5. Diseños experimentales	28
2.2.6. Teoría del diseño hexagonal	30
2.2.7. Reactivos de flotación.....	31
2.2.8. Cinética de flotación	33
2.2.9. Ángulo de contacto	34
2.2.10.El colector xantato isopropílico de sodio.....	36
2.3. Definición de términos básicos	37
2.4. Formulación de hipótesis	39
2.4.1. Hipótesis general.....	39
2.4.2. Hipótesis específica.....	39
2.5. Identificación de variables	39
2.5.1. Variable independiente	39
2.5.2. Variable dependiente	40
2.6. Definición operacional de variables e indicadores	40

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación	41
3.2. Nivel de investigación	41
3.3. Métodos de investigación.....	41
3.4. Diseño de investigación	42

3.5. Población y muestra	42
3.5.1. Población.....	42
3.5.2. Muestra.....	44
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	45
3.6.1. Técnicas.....	45
3.6.2. Instrumentos.....	45
3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	46
3.8. Tratamiento estadístico.....	47
3.9. Orientación ética filosófica y epistémica	47

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Descripción del trabajo de campo	48
4.1.1.	Estudio de microscopia	52
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados	55
4.2.1.	Determinar el efecto del consumo de xantatos Z11 y Z6	55
4.2.2.	Examinar la correlación entre el tamaño de las partículas del mineral	59
4.2.3.	Mejorar los tiempos y las condiciones de preparación de los reactivos..	63
4.3.	Prueba de hipótesis	74
4.3.1.	Hipótesis general.....	74
4.3.2.	Hipótesis especifica 1	74
4.3.3.	Hipótesis especifico 2	75
4.3.4.	Hipótesis especifico 3	76
4.3.5.	Regresiones entre elementos químicos	76
4.3.6.	Regresiones estadísticas.....	77

4.4. Discusión de resultados	80
4.4.1. Recuperaciones	82
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES	
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	
ANEXOS	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones e indicadores de las variables de investigación operación..	40
Tabla 2. Reservas y Recursos minerales de la mina Huarón, 30 de junio de 2024 (Pan American Silver)	43
Tabla 3. Ensayes químicos de una ley de cabeza.....	56
Tabla 4. Condiciones de flotación batch	58
Tabla 5. Tiempo óptimo de molienda de mineral 60% m-200 malla = 16,57 minutos	60
Tabla 6. Clasificación del índice de trabajo (Wi) en función de la dureza del mineral	62
Tabla 7. Presentación de las variables y rangos	64
Tabla 8. Variables decodificadas.....	65
Tabla 9. Regresiones cinética selectivo circuito cobre	77
Tabla 10. Balances metalúrgicos.....	82

INDICE DE FIGURA

Figura 1. Esquema de una celda de flotación.....	16
Figura 2. Formación de la doble capa eléctrica	18
Figura 3. Modelo de la doble capa eléctrica	20
Figura 4. Mecanismo de fractura de partículas en molienda	25
Figura 5. Representación gráfica de diseño hexagonal.....	30
Figura 6. Esquema del ángulo de contacto	35
Figura 7. Concentrado cobre malla +400.....	53
Figura 8. Concentrado cobre malla +400.....	54
Figura 9. Concentrado cobre malla +400.....	55
Figura 10. Curva de moliendabilida.....	60
Figura 11. Diagrama de pareto de efectos estandarizados	69
Figura 12. Gráfico de efectos principales recuperación Cobre.....	70
Figura 13. Gráfico de contorno	71
Figura 14. Gráfico de superficie de recuperación de cobre	72
Figura 15. Optimización de respuesta.....	73

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

La proveeduría periódica de nutrientes a las plantas colectoras, junto con el aumento en la demanda global de metales y la mayor dificultad para descubrir nuevos yacimientos, subraya la importancia de adoptar enfoques innovadores en la investigación geológica, facilitando un aprovechamiento más eficiente de los recursos minerales.

El análisis químico de un mineral no determina de manera exacta la cantidad de cada uno de sus componentes, pero proporciona información general sobre las propiedades esenciales de los elementos que lo constituyen.

En la planta de procesamiento que trata el cobre, conocida como mineral de campaña, se ha identificado la presencia de plata junto con el cobre, además de detectar que una parte de esta también se encuentra en el relave. Observaciones microscópicas han revelado que parte de la plata está asociada a la calcopirita, mientras que otras partículas están libres, pero en un tamaño muy fino, lo cual representa una preocupación para la gerencia. Resulta fundamental desarrollar

investigaciones orientadas a identificar métodos que optimicen la purificación de la plata a partir del concentrado de cobre, empleando para ello un proceso de separación por flotación.

La técnica del análisis mineralógico se enfoca en identificar los minerales presentes y en comprender en detalle sus características físicas y químicas. Esta teoría indica que las partículas minerales deben ser reducidas hasta ser liberadas, es decir, no deben estar en condición mixta, para que se adhieran a la espuma, y su superficie debe ser acondicionada con reactivos de flotación, considerando la termodinámica y cinética de flotación.

Esto implica comprender las fuerzas que impulsan la adhesión, ayudando a determinar las condiciones óptimas para la flotación. Es necesario revisar la diferencia de energía libre superficial entre las partículas mineralizadas y el agua, donde las partículas mineralizadas con superficies hidrofóbicas tienen mayor afinidad por el aire y las hidrofílicas tienen más afinidad por el agua.

1.2. Delimitación de la investigación

1.2.1. Delimitación geográfica

La investigación se llevará a cabo en la unidad minera Huarón, operada por Pan American Silver Huaron S.A., ubicada en el distrito de Huayllay, provincia y región Pasco, Perú.

1.2.2. Delimitación de la población

El estudio considerará como base de análisis los registros de operación, los datos metalúrgicos y la información relacionada con el uso de reactivos químicos generados en la planta de procesamiento de minerales de dicha unidad minera.

1.2.3. Delimitación tiempo

El proyecto de investigación se desarrolló entre el 8 de mayo y el 31 de octubre de 2022, siguiendo la programación establecida en el cronograma de Gantt.

La investigación se realizará utilizando el mineral de cobre conocido como "campana", con una proyección de cerca de 6000 toneladas mensuales. Se recolectarán muestras del producto final del chancado, que será enviado al molino primario. En el laboratorio experimental, se llevarán a cabo pruebas metalúrgicas mediante un diseño hexagonal, utilizando cinéticas de flotación y ensayos por lotes. Los cálculos se fundamentarán en los informes de ley del laboratorio químico, que serán procesados en la oficina de la planta.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cómo se puede aumentar la eficiencia en la recuperación de cobre a través de la optimización del consumo de xantatos Z11 y Z6 mediante un diseño experimental en la planta concentradora en Pan American Silver Huarón S.A., Pasco 2024?

1.3.2. Problemas específicos

- a. ¿Cuál es el impacto del consumo de diferentes proporciones de xantatos Z11 y Z6 en la recuperación de cobre mediante ensayos metalúrgicos en la planta concentradora en Pan American Silver Huarón S.A., Pasco 2024?
- b. ¿Qué relación existe entre la granulometría del mineral de cobre y la eficacia en el uso de los xantatos Z11 y Z6 durante el proceso de recuperación metalúrgica, mediante análisis de tamaño de

partícula y flotación selectiva?

- c. ¿Cómo influye la optimización del tiempo de acondicionamiento de los reactivos de flotación en la recuperación de cobre utilizando xantatos Z11 y Z6 en la planta concentradora en Pan American Silver Huarón S.A., Pasco 2024?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar y optimizar el uso de xantatos Z11 y Z6 para aumentar la eficiencia en la recuperación de cobre a través de un diseño experimental en la planta concentradora de la empresa minera Huarón S.A., Pasco 2024.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Identificar el impacto del consumo de diversos xantatos Z11 y Z6 en la recuperación de cobre a través de ensayos metalúrgicos en la planta concentradora de Huarón S.A., Pasco 2024.
- b. Examinar la relación entre la granulometría del mineral de cobre y la eficacia en el uso de xantatos Z11 y Z6 en el proceso de recuperación metalúrgica, mediante análisis de tamaño de partícula y pruebas de flotación selectiva.
- c. Optimizar los tiempos de las condiciones para el acondicionamiento de los reactivos de flotación con el fin de maximizar la recuperación de cobre utilizando xantatos Z11 y Z6 en la planta concentradora de Huarón S.A., Pasco 2024.

1.5. Justificación de la investigación

- **Técnica.** En los procesos de concentración de minerales de cobre por flotación se controlan diversas variables, entre ellas los colectores,

espumantes, depresores y modificadores. La presente investigación se orienta a optimizar la combinación de xantatos Z11 y Z6 con el propósito de incrementar la recuperación de cobre durante la etapa de flotación, buscando a la vez obtener una adecuada recuperación de plata.

- **Económica.** Al evaluar la eficiencia y efectividad de un colector principal durante el proceso de optimización, se pueden comparar los costos enviando muestras de reactivos junto con sus precios de referencia a la empresa. Este procedimiento ofrece un doble beneficio: permite lograr una recuperación metalúrgica eficiente a menor costo y, al mismo tiempo, mejora la comercialización del concentrado de cobre con contenido de plata, generando ventajas económicas significativas que favorecen tanto a la empresa como a su personal.
- **Medio ambiente.** La etapa de molienda cumple una función esencial en la reducción del tamaño de partícula del mineral de cobre, lo que se relaciona directamente con la calidad del concentrado y el retorno económico del proceso. Resulta fundamental emplear reactivos que favorezcan la máxima recuperación de cobre durante la flotación, evitando la sobremolienda o la pérdida de minerales valiosos en el relave en forma laminar. Esta estrategia no solo contribuye a la preservación del medio ambiente y el equilibrio ecológico, sino que también fortalece la protección de la salud de las poblaciones aledañas.

1.6. Limitaciones de la investigación

La presente investigación presenta algunas limitaciones que deben considerarse cuidadosamente al interpretar los resultados obtenidos:

- **Disponibilidad de muestras:** Los controles metalúrgicos se realizaron

utilizando muestras de mineral recolectadas en un intervalo de tiempo determinado, por lo que los resultados no necesariamente representan de manera completa la variabilidad mineralógica presente en toda la unidad minera.

- Condiciones de laboratorio vs. Planta: Los ensayos batch de flotación en laboratorio, aunque controlados, no reproducen al 100% las condiciones dinámicas de la planta concentradora (flujos variables, recirculaciones carga, distribución granulométrica, etc.), lo que puede generar diferencias entre la recuperación obtenidas en las pruebas y la real en operación.
- Limitación en el número de pruebas: Debido a restricciones de tiempo, costo y disponibilidad de reactivos, el número de réplicas y combinaciones de consumo de xantato fue limitado, lo que restringe la robustez estadística de algunas conclusiones.
- Factores externos: otras variables que también influyen en la recuperación, como la temperatura, la mineralogía secundaria o la presencia de elementos penalizantes (arsénico, pirita), no fueron consideradas en el diseño experimental, pudiendo tener un impacto en los resultados globales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

Al examinar la literatura disponible en línea relacionada con el estudio de investigación que proponemos, hemos encontrado varios ejemplos significativos que nos gustaría compartir:

La investigación realizada por estudiantes de la Universidad de Ingeniería (Estambul, 2022) y presentada como tesis de pregrado por Rodríguez y Júnior (2022) en la Universidad Nacional de Ingeniería puede sintetizarse de la siguiente manera:

El trabajo se desarrolló en el centro de investigación de la empresa CMCZ S.A.C., teniendo como propósito principal efectuar un análisis detallado en el campo de la metalurgia, enfocado en evaluar los efectos del proceso de flotación sobre el concentrado mixto de cobre y plomo (Cu-Pb). Esta evaluación busca identificar y resolver los problemas asociados con el alto contenido de zinc que se transfiere al concentrado bulk, el cual también incluye oro.

Con el propósito de alcanzar este parámetro, se aplicaron diseños experimentales orientados a identificar y optimizar las variables vinculadas al proceso de flotación del concentrado bulk. Estos diseños experimentales facilitaron una evaluación detallada y una optimización eficaz de los parámetros, lo que permitió reducir considerablemente los costos relacionados con la investigación en la evaluación del proceso de flotación.

En esta evaluación, se inició con una fase preliminar de descarte empleando un diseño de experimento fraccionado. Se definió una variable de respuesta correspondiente a la recuperación de cobre y al desplazamiento del zinc. Durante el proceso de flotación del concentrado bulk se evaluaron cuatro factores experimentales: la liberación del concentrado (% malla -200), el NaCN, el ZnSO_4 y el NaHSO_3 . Este enfoque permitió analizar el comportamiento y el efecto de cada uno de estos parámetros en la flotación del concentrado bulk, con el objetivo de identificar aquellos de mayor relevancia para avanzar hacia la etapa de optimización.

Una vez identificado el factor de mayor relevancia, se implementará un diseño experimental de ocho corridas orientado a optimizar el control del arrastre de zinc. La aplicación de este ajuste en la etapa de planta permitirá reducir los costos asociados al consumo de reactivos y a los insumos empleados, al mismo tiempo que incrementará el volumen de concentrado bulk disponible para su comercialización.

Tras identificar las características principales, se aplicó un diseño experimental en forma de octágono con el fin de optimizar de manera más eficiente la reducción del desplazamiento de zinc. La implementación de este diseño en la etapa de planta permitirá disminuir los costos vinculados al consumo

de materiales y al uso de equipos en el proceso de flotación. Esta optimización aumentará el valor comercial del concentrado bulk, mejorando su calidad y rentabilidad en el mercado.

En el contexto de las pruebas metalúrgicas orientadas a maximizar el uso de los xantatos Z11 y Z6 en el proceso de separación de cobre, la experimentación constituye un elemento clave para incrementar la eficacia del procedimiento de flotación. La aplicación de diseños factoriales y de tipo octogonal permite identificar y optimizar las variables críticas que influyen tanto en la recuperación de cobre como en la reducción del desplazamiento. Este enfoque detallado no solo mejora la selectividad y la eficiencia del proceso, sino que también contribuye a una reducción significativa de los costos operativos mediante un uso más racional de los recursos.

El uso de mezclas de xantatos Z11 y Z6 durante la agitación de minerales de cobre ha demostrado ser favorable tanto para mejorar la recuperación de metales como para incrementar la calidad del concentrado final. La optimización de estos reactivos mediante diseños experimentales permite un control más preciso de las condiciones de flotación, lo cual resulta esencial para alcanzar mayores porcentajes de recuperación de cobre y reducir las pérdidas de otros metales de valor económico. Este enfoque también permite una mejor comprensión del comportamiento de los minerales bajo diferentes condiciones de flotación, facilitando ajustes rápidos y eficientes en la planta de procesamiento.

Asimismo, la aplicación de estos análisis no solo fortalece la capacidad operativa de la planta de procesamiento, sino que también ejerce un impacto positivo en el entorno ambiental y en la comunidad local. Al disminuir la cantidad de reactivos requeridos y elevar la eficiencia del proceso, se reduce la generación

de residuos y se atenúan los efectos ambientales asociados. De igual modo, la optimización del procedimiento y la reducción de los costos de operación aportan beneficios económicos tanto para la empresa como para su personal, favoreciendo una operación más sostenible y socialmente responsable.

Ramón (2023), en su tesis de pregrado presentada en la Universidad Nacional de Ingeniería titulada **“Optimización de un concentrado de cobre mediante diseño de experimentos para incrementar la ley de oro y cobre”**, expone en su resumen lo siguiente:

El estudio se llevó a cabo en la Central de Flotación, una planta ubicada en la provincia de Huaral, departamento de Lima, enfocándose en los factores metalúrgicos que afectan la extracción de cobre a partir del concentrado. El objetivo principal fue encontrar soluciones a los problemas de baja ley y bajo porcentaje de recuperación de cobre y oro en dicho concentrado. Para ello, se empleó un enfoque experimental que permitió medir y optimizar las variables del proceso de flotación. Esta metodología no solo mejoró la eficiencia del sistema, sino que también redujo de manera significativa los costos asociados a la investigación.

En esta investigación se desarrolló una etapa inicial de eliminación empleando un diseño factorial fraccionado, considerando como variables de respuesta la recuperación de cobre y de oro. Durante las pruebas de flotación del mineral de cobre se evaluaron como factores experimentales el NaCN, el xantato Z-11, el porcentaje de liberación a malla -200 y el reactivo P-204. El objetivo fue determinar la relevancia e impacto de cada uno de estos parámetros en la recuperación de cobre y oro, con el fin de identificar los dos de mayor influencia para la fase de optimización del proceso.

Posteriormente se identificarán los factores de mayor relevancia y, a partir de ello, se aplicará un diseño experimental de tipo octogonal para reorientar el objetivo central del estudio, que consiste en incrementar el contenido de cobre y oro en el concentrado. Esta estrategia de optimización no solo mejora la calidad del concentrado de cobre, sino que también contribuye a la reducción de los costos operativos de la empresa. Entre los beneficios esperados se incluyen una menor demanda de reactivos, la disminución en el uso de equipos y un aumento en el valor comercial del concentrado, generando así una ventaja económica para la organización.

La evaluación metalúrgica destinada a optimizar el uso de xantatos Z11 y Z6 en la recuperación de cobre mediante el diseño experimental es crucial para mejorar los procesos de flotación en las plantas concentradoras. La aplicación de técnicas de diseño experimental, tales como el diseño factorial fraccionado y el diseño octogonal, facilita una evaluación precisa y una optimización efectiva de los parámetros que afectan la recuperación de cobre y plata. La identificación y optimización de los factores más críticos permite introducir mejoras sustanciales en el proceso, incrementando tanto la eficiencia operativa como la calidad del concentrado final, y atendiendo a problemáticas comunes como el alto contenido de hierro en el concentrado de cobre.

El uso combinado de xantatos Z11 y Z6 en la etapa de flotación de minerales de cobre, acompañado de un análisis exhaustivo, permite reducir el contenido de cobre en los relaves y aumentar la recuperación tanto de cobre como de plata. Mediante un diseño experimental de ocho ensayos para definir los parámetros óptimos, se busca no solo elevar la calidad del concentrado final, sino también disminuir los costos operativos diarios. Este enfoque contribuye a reducir

el consumo de reactivos y de energía, lo que repercute directamente en la eficiencia del proceso. Además, la optimización favorece una mayor recuperación de metales de interés económico, incrementando así el valor comercial del concentrado.

Además de los beneficios operativos y económicos, la optimización del proceso de flotación mediante ensayos experimentales genera impactos positivos en el medio ambiente y contribuye a la sostenibilidad del sistema productivo. La disminución en el uso de reactivos y energía ayuda a reducir los residuos y la huella ecológica de la planta concentradora. Esto, a su vez, fortalece la relación de la empresa con las comunidades locales y asegura el cumplimiento de estándares ambientales que son cada vez más rigurosos.

Alvar Haynalaya (2023), en su tesis de pregrado presentada en la Universidad Nacional del Centro del Perú titulada “Optimización del uso de xantatos para incrementar la recuperación de cobre y reducir el arrastre de zinc en la flotación bulk de la planta concentradora”, señala en su resumen que la compañía minera Casapalca opera un sistema de concentración por igualación que sigue un esquema convencional para el tratamiento de minerales sulfurados. Esta planta está orientada a la obtención y procesamiento de concentrados que contienen metales de alto valor comercial, como plomo, cobre, zinc y plata.

En el laboratorio de metalurgia de la planta concentradora Casapalca se llevaron a cabo ensayos orientados a optimizar el uso de los xantatos Z-11 y Z-6, así como a determinar el porcentaje de liberación más adecuado a través de la malla -200. Este estudio evaluó diferentes estrategias para mejorar la aplicación de estos reactivos, con el propósito de incrementar la recuperación de cobre y reducir el arrastre de zinc durante la etapa de flotación.

En el análisis efectuado en la unidad de concentración de C.M. Casapalca, el objetivo central fue perfeccionar el empleo de xantatos para maximizar la extracción de cobre presente en menas auríferas y, simultáneamente, disminuir el desplazamiento de zinc en la fase de flotación bulk.. Con este propósito se formuló la siguiente hipótesis de trabajo: *¿es posible optimizar el uso de xantatos para mejorar la separación del cobre de sus minerales asociados y, al mismo tiempo, reducir el desplazamiento de zinc durante la concentración?* Para abordar esta cuestión, la investigación adoptó un enfoque experimental basado en un diseño de investigación de tipo hexagonal, aplicando estadística inferencial para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos.

La evaluación metalúrgica orientada a optimizar el consumo de xantatos Z11 y Z6 mediante un diseño experimental representa un avance significativo en el perfeccionamiento de los procesos de la industria minera. Este enfoque busca no solo incrementar la eficiencia en la recuperación de cobre, sino también disminuir el consumo de reactivos químicos, generando así beneficios tanto económicos como ambientales. La implementación de un diseño experimental permite estructurar la investigación de manera rigurosa, facilitando la obtención de datos precisos y la interpretación de resultados con relevancia estadística.

Este tipo de investigación proporciona una base sólida para innovar en los procesos metalúrgicos, al enfocarse en optimizar el empleo de xantatos. Analizar distintas variables y condiciones operativas permite identificar el punto de equilibrio adecuado entre la recuperación de cobre y la reducción de pérdidas hacia los relaves, aspectos esenciales para la eficiencia de la flotación en una planta concentradora.

La aplicación de estos resultados no solo incrementa la rentabilidad de las operaciones mineras, sino que también favorece la sostenibilidad al disminuir el consumo de reactivos químicos y reducir la generación de residuos.

En el campo de la investigación metalúrgica, la incorporación de diseños experimentales avanzados, como el modelo hexagonal en la estadística de prueba, refleja un compromiso con la precisión y la confiabilidad de los resultados. Esta cualidad es esencial para asegurar la validez de los hallazgos científicos en un entorno industrial tan complejo como el minero. La habilidad para modificar variables y evaluar hipótesis de manera estructurada asegura que las conclusiones obtenidas sean aplicables directamente a la mejora continua de los procesos metalúrgicos, lo que a su vez fomenta una industria minera más eficiente y sostenible.

2.2. Bases teóricas – científicas

2.2.1. Flotación de minerales sulfurados:

Según Alvarado y Huaynalaya (2023), la flotación es un proceso de concentración de minerales que busca separar las especies valiosas de las impurezas mediante un mecanismo fisicoquímico. Este método modifica las condiciones superficiales para favorecer la adherencia de burbujas de aire a las partículas minerales, formando agregados que ascienden y se concentran en la capa de espuma. A este procedimiento se le conoce comúnmente como flotación por espuma. En comparación con otros métodos de concentración que son puramente físicos, la flotación presenta varias ventajas significativas.

La flotación ofrece una notable flexibilidad para llevar a cabo una concentración selectiva, lo que permite obtener concentrados de alta calidad y pureza, compuestos principalmente por minerales sulfurados y con escasa

presencia de minerales oxidados. Esta versatilidad se consigue a través de la combinación adecuada de aditivos o reactivos de flotación, lo que facilita su implementación en procesos a gran magnitud que utilizan tecnología de medición y control automatizado. Asimismo, esta técnica resulta particularmente apropiada para pulpas que contienen una amplia distribución de tamaños de partícula, desde 48 mallas por pulgada hasta fracciones de algunas micras.

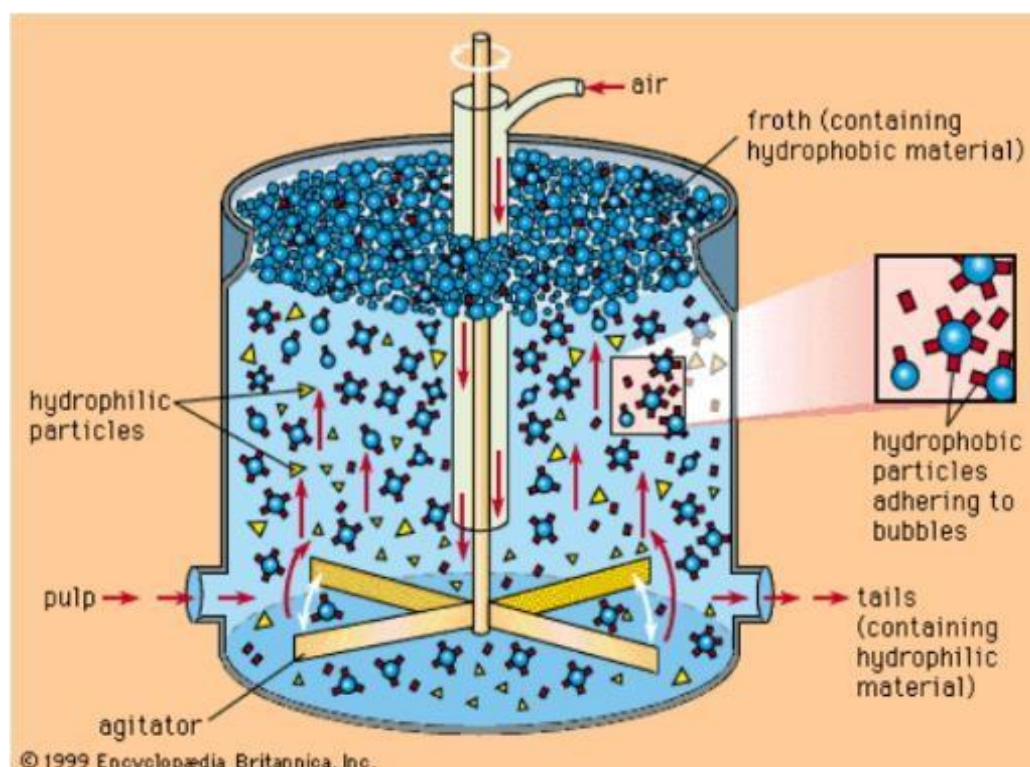
La flotación se integra con facilidad a técnicas avanzadas de molienda y clasificación, así como a sistemas automatizados de tratamiento de productos que incluyen bombas para la separación de las fases sólida y líquida. El principio esencial de este proceso consiste en la adhesión de las partículas minerales a las burbujas de aire, lo que favorece una separación más eficiente. Esta versatilidad convierte a la flotación en una herramienta clave para la minería, ya que permite incrementar la recuperación de minerales de valor y cumplir con los estándares ambientales vigentes. En este procedimiento, el mineral se acondiciona en una pulpa con tamaño de partícula cercano a 48 mallas (297 micras).

La pulpa previamente compactada se diluye con agua hasta alcanzar una concentración comprendida entre el 25 % y el 45 % en volumen. La modificación superficial de determinadas especies minerales se realiza mediante la adición de pequeñas cantidades de reactivos específicos, diseñados para interactuar con los minerales que se busca recuperar por flotación. Uno de estos reactivos recubre la superficie del mineral, confiriéndole propiedades aerofílicas e hidrofóbicas. Posteriormente, se agrega un segundo reactivo que favorece la formación de una espuma de estructura estable.

En recipientes adecuados, la pulpa previamente acondicionada se pone en contacto con una corriente de aire, la cual puede introducirse mediante agitación

o inyección suave. Este proceso permite que las partículas finas de mineral se adhieran a las burbujas de aire y asciendan hasta la superficie de la suspensión, donde pueden ser recolectadas y separadas con facilidad. Este mecanismo, conocido como flotación, resulta esencial en la minería, ya que posibilita la separación de minerales de alto valor, incrementando la recuperación de metales y, al mismo tiempo, contribuyendo a disminuir el impacto ambiental del proceso.

Figura 1. Esquema de una celda de flotación



Nota: La flotación consiste en la interacción de las partículas minerales con burbujas de aire, fenómeno que permite su separación al adherirse y ascender en la pulpa. Este proceso representa un mecanismo macroscópico en el que intervienen las propiedades de hidrofobicidad y aerofilia presentes en la superficie de los minerales.

2.2.2. Fenómenos eléctricos en la interface mineral-agua

Las propiedades superficiales de los minerales comprenden el potencial eléctrico y la carga generada en la interfase mineral-pulpa, es decir, en el límite entre el mineral y el agua. Esta doble capa eléctrica resulta esencial para mantener

el equilibrio de cargas en todo el sistema. Dichas características influyen de manera decisiva en el comportamiento de la superficie mineral y en su interacción con los reactivos químicos, aspectos fundamentales para los procesos de separación empleados en la industria minera.

El efecto electroquímico presente en la superficie mineral influye directamente en su afinidad con los reactivos de flotación, impactando de manera positiva o negativa la capacidad y la selectividad del proceso de separación. Comprender y controlar las propiedades superficiales resulta esencial para maximizar la recuperación de minerales de valor y aumentar la eficiencia de los métodos de extracción metálica. Por ello, el conocimiento de la dinámica de la doble capa eléctrica en la flotación es fundamental para diseñar procedimientos más eficientes y sostenibles dentro de la actividad minera.

La doble capa eléctrica que se forma en la interfase mineral-agua puede asimilarse a un condensador o a una resistencia, lo que permite su análisis en condiciones de laboratorio para describir con detalle los fenómenos superficiales y las características de las reacciones involucradas. Este proceso electroquímico proporciona información valiosa sobre cómo las propiedades de la superficie mineral influyen en su comportamiento durante la flotación, donde la interacción con los reactivos químicos resulta fundamental para lograr una separación eficiente de los minerales de valor económico.

La generación de carga en la superficie de los minerales puede deberse a distintos factores, entre los que se destacan:

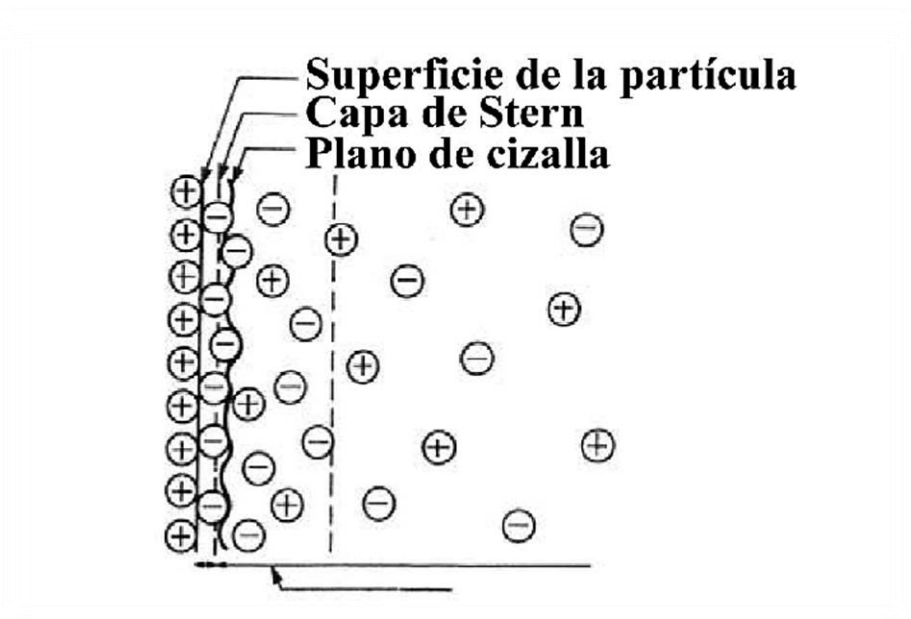
- La distribución heterogénea de los iones que constituyen la estructura del mineral.
- La modificación de los minerales a través de procesos de ionización.

- La presencia e incorporación de iones específicos en el agua.
- El reemplazo isomórfico dentro de la red cristalina.
- La orientación cristalográfica de las superficies minerales.

En la figura adjunta se muestra la representación de una doble capa eléctrica en la superficie, evidenciando la distribución de cargas positivas y negativas.

Formación de la doble capa eléctrica: en la región donde se superponen las dobles capas de dos superficies, el potencial eléctrico se incrementa por encima de los valores habituales, debido a la presencia de una concentración elevada de aniones y cationes que rompe el equilibrio de cargas.

Figura 2. *Formación de la doble capa eléctrica*



Nota: La formación de la capa eléctrica ocurre cuando se superponen las dobles capas de dos sustancias, lo que provoca un aumento del potencial eléctrico en la región de contacto, originado por una concentración de iones y electrones superior a la normalmente presente.

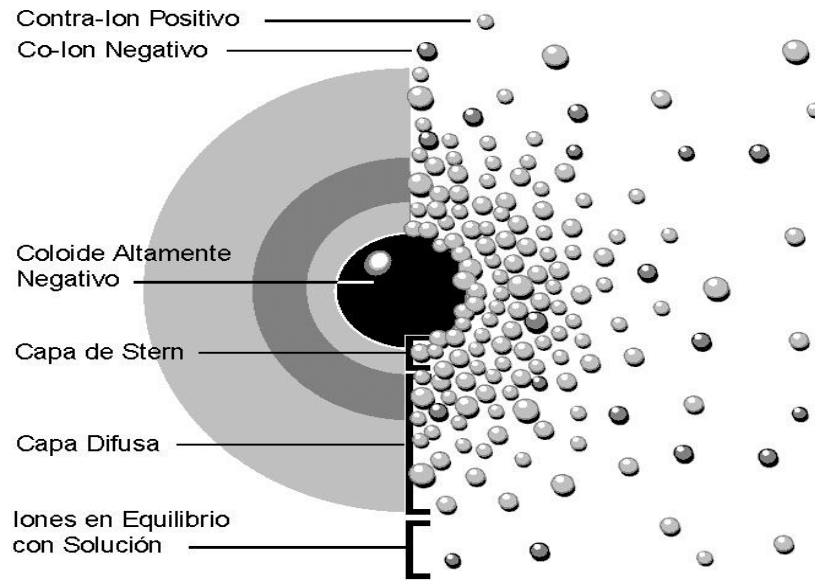
Este modelo se conoce como el prototipo de Stern de la doble capa eléctrica. En este esquema, los iones que permanecen adsorbidos en la superficie

del mineral y que determinan el potencial de atracción hacia dicha superficie se denominan iones potenciales. Estos pueden formar parte del propio mineral, como los iones hidrógeno (H^+) o hidróxido (OH^-), o bien corresponder a iones que generan sales poco solubles con los presentes en la superficie mineral, e incluso a iones que establecen asociaciones con ellos. Este modelo resulta esencial para comprender cómo los componentes químicos interactúan con las superficies minerales, lo que permite optimizar la eficiencia y la selectividad en los procesos de separación de minerales.

En el esquema B, los iones positivos presentes en la sustancia son atraídos hacia el plano de la superficie mineral, generando una capa de carga positiva. Esta corriente se equilibra mediante una zona menos estructurada de iones con carga negativa en el fluido, denominada capa de contraiones. Estos contraiones conforman la capa difusa o capa de Gouy, cuya función es mantener el equilibrio eléctrico del sistema. Este fenómeno resulta fundamental para comprender el origen de la doble capa eléctrica y su influencia en la interacción entre los componentes químicos y la superficie mineral durante procesos metalúrgicos como la flotación.

La doble capa eléctrica permite evidenciar el entorno en el que se distribuye una carga eléctrica.

Figura 3. Modelo de la doble capa eléctrica



Nota: Un coloide con alta carga negativa origina una capa de Stern, la cual está seguida por una capa difusa que se mantiene en equilibrio con la solución circundante. (Instruments.)

En la doble capa eléctrica, el campo eléctrico disminuye progresivamente desde el valor inicial presente en la superficie, conocido como potencial superficial, hasta anularse en el interior del líquido o la pulpa. Esta estructura se segmenta en diferentes zonas en función de la distancia δ medida desde la superficie del mineral, que define las regiones adyacentes:

- La primera capa de la doble capa eléctrica corresponde a la superficie plana del mineral.
- La segunda capa, formada por los iones específicamente adsorbidos sobre la primera, se denomina capa de Stern.
- La tercera capa eléctrica se ubica en la interfase entre los compuestos fijados al mineral y aquellos que pueden desplazarse en la suspensión; esta zona está relacionada con el fenómeno de potencial de electrocinética, también llamado potencial zeta. (ξ).

Los fenómenos de adsorción en la interfase mineral-agua están principalmente regulados por la doble capa eléctrica. Esta se forma a partir de la interacción de los electrolitos presentes en la solución acuosa, donde una parte de los iones queda dispersa y, junto con los iones superficiales del mineral, constituyen la doble capa eléctrica. Esta estructura resulta fundamental para comprender los mecanismos de adsorción que intervienen en procesos como la flotación y otras operaciones metalúrgicas.

Zonas de la doble capa eléctrica: esta estructura se conforma por tres regiones principales: la superficie de carga del mineral, la capa de Stern que incluye los iones presentes en la fase acuosa adyacente a la superficie, y la fase líquida circundante que completa el sistema.

2.2.3. Tipos de celda de flotación

Una celda de flotación es un equipo en el cual las burbujas de aire entran en contacto con las partículas minerales, permitiendo que estas se adhieran a su superficie y se separen de manera eficiente. Para asegurar un funcionamiento eficiente, es esencial que tanto el aire como las partículas se dispersen adecuadamente, y que se genere una espuma estable. Esto garantiza que los productos obtenidos, ya sean concentrados o relaves, cumplan con los estándares legales y los índices de recuperación y eliminación requeridos.

Las celdas de flotación se dividen en dos tipos principales: neumáticas y mecánicas. Las diferencias esenciales entre estas categorías radican en su modo de operación, el sistema de impulsión, el diseño del dispersor encargado de transformar la energía del aire en burbujas, así como en el rango de velocidad de agitación y la intensidad de mezcla que pueden generar. Estos aspectos no solo influyen en el costo del equipo, sino también en la velocidad del aire y las

condiciones hidrodinámicas dentro de la celda. Por lo tanto, cualquier modificación en estos factores altera las condiciones de operación de la celda de flotación (Astucuri, 1981).

Una celda de flotación funciona como un sistema de impulsión donde las burbujas de aire interactúan de manera selectiva con las partículas minerales, permitiendo su adhesión y posterior separación. La eficiencia de este proceso depende de la adecuada dispersión tanto del aire como de las partículas, así como de la formación de una espuma estable que facilite la recuperación del mineral. Estos factores son clave para garantizar que los productos resultantes, tanto los concentrados como los relaves, cumplan con los estándares legales y los niveles deseados de recuperación y eliminación. Si la dispersión y la estabilización de la espuma no se logran de manera eficiente, la calidad de los productos finales y la viabilidad económica del proceso de flotación se verían afectadas.

Las celdas de flotación se dividen en dos clases fundamentales: neumáticas y mecánicas. Las diferencias fundamentales entre estos tipos incluyen la configuración del equipo, la estructura del impulsor, el diseño del dispersor de aire, así como el rango de velocidad y flujo de agitación. Estos factores no solo afectan el costo del equipo, sino también las condiciones hidrodinámicas presentes en la celda, las cuales inciden de manera directa en la eficiencia del proceso de flotación. Cualquier modificación en estos componentes puede alterar las condiciones de operación, destacando la importancia de optimizar tanto el diseño como la operación para maximizar la recuperación de minerales valiosos y cumplir con los estándares de calidad y ambientales.

Celdas mecánicas: Estas celdas de flotación se caracterizan por contar con un impulsor que agita mecánicamente la pulpa y dispersa el aire en su interior.

Son particularmente eficaces para lograr mayores recuperaciones en minerales de baja ley, lo que las hace ideales para las fases iniciales de flotación y validación. Existen dos tipos principales de celdas mecánicas: las que utilizan aire comprimido, en las cuales un ventilador externo introduce el aire en la pulpa, y las autoventiladas, donde el aire es aspirado debido al vacío generado por el propio impulsor. Esta diferencia en el mecanismo de introducción del aire es fundamental para su funcionamiento y eficiencia en la separación mineral.

Existen dos tipos principales de estas unidades: las que funcionan con aire comprimido, donde un ventilador externo introduce aire en la pulpa, y las autoventiladas, en las que el aire es aspirado debido al vacío generado por el propio impulsor. Esta diferenciación en el mecanismo de entrada de aire es crucial para su funcionamiento y eficiencia en el proceso de separación mineral.

Celdas neumáticas: A diferencia de las celdas equipadas con motores, este tipo de dispositivo no utiliza un impulsor, sino que emplea aire precomprimido para agitar y airear la pulpa. Las celdas de columna, en las que el flujo de aire y de pulpa se desplaza en sentido contrario (contracorriente), representan el diseño más característico de esta categoría. Estas celdas se emplean comúnmente en las etapas de purificación de la flotación, ya que permiten obtener concentrados de mayor pureza.

2.2.4. Conminución

En la investigación de posgrado de Huapalla (2023) se señala que el proceso descrito consiste en reducir gradualmente el tamaño del mineral que contiene las especies de interés. Este procedimiento es fundamental para liberar las partículas valiosas de la ganga a la que se encuentran adheridas. Una vez expuesta la superficie del mineral y alcanzada la granulometría requerida, el

material se conduce a la etapa de concentración para la recuperación de las especies metálicas de valor. Esta fase es esencial para separar de manera efectiva la mena de la ganga y obtener un producto de alta pureza.

Este procedimiento reviste gran importancia en el ámbito de la minería y la metalurgia, ya que la liberación del mineral mediante la reducción de tamaño favorece una concentración más eficiente de las especies de interés. Esta práctica no solo incrementa la capacidad del proceso, sino que también optimiza la recuperación de minerales valiosos al garantizar que una mayor proporción de partículas metálicas quede disponible para la etapa de concentración. La adecuada elección del tamaño de partícula promueve un proceso de concentración más eficiente y económico, lo que a su vez contribuye a la rentabilidad y sostenibilidad de las operaciones mineras.

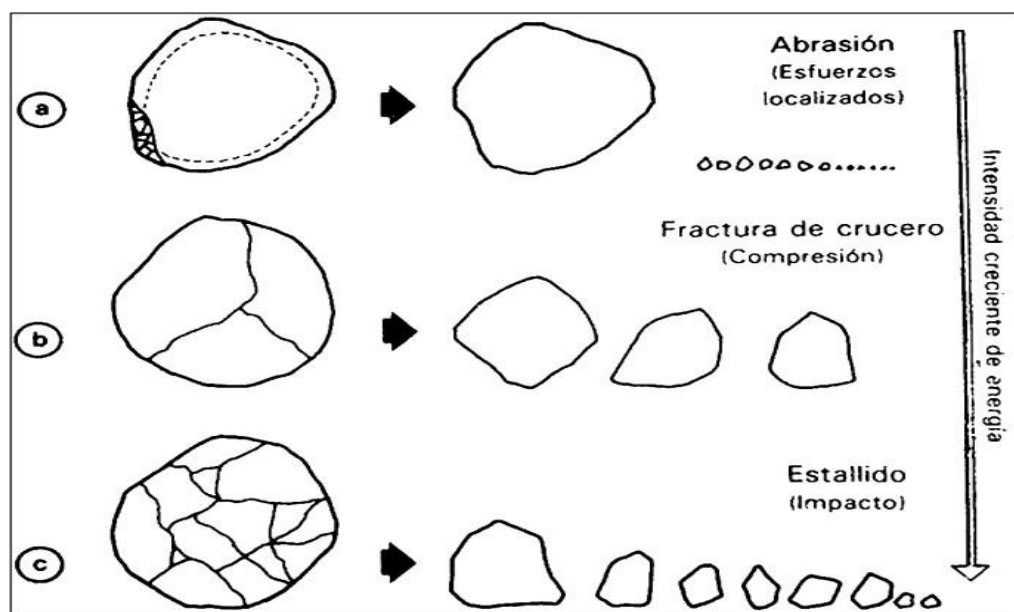
El proceso de reducción de tamaño resulta esencial para preparar el mineral antes de las etapas posteriores de tratamiento. Al facilitar la liberación de las menas de la ganga, se mejora el acceso a los componentes químicos de interés durante la fase de concentración. Esta etapa preliminar no solo influye en la eficiencia de la separación mineral, sino que también puede impactar la calidad del concentrado final y la rentabilidad del proyecto minero. Por ello, comprender y optimizar este procedimiento es clave para maximizar la recuperación de minerales valiosos y, al mismo tiempo, disminuir el impacto ambiental asociado a la actividad minera.

- **Fractura por abrasión:** Cuando se aplican fuerzas de erosión sobre la superficie de un material, normalmente se producen dos tipos de partículas: unas de tamaño muy fino y otras cuya dimensión se aproxima a la del material original. Este fenómeno se observa frecuentemente en

molinos, donde las partículas se rozan entre sí y con los cuerpos moledores, lo que da lugar a una distribución diversa de tamaños de partículas.

- **Fractura por compresión:** La aplicación de fuerzas compresivas a baja velocidad da lugar a la formación de partículas de tamaños tanto finos como gruesos. Un caso típico de este proceso se encuentra en las chancadoras, donde las partículas se quiebran entre una superficie fija y otra móvil.
- **Fractura por impacto:** Cuando se aplican fuerzas de compresión a temperaturas elevadas, se produce una gran cantidad de partículas finas junto con una amplia variedad de tamaños y tipos. Un ejemplo representativo de este fenómeno se observa en los molinos de bolas, donde las partículas son golpeadas directamente por las bolas al caer sobre ellas.

Figura 4. *Mecanismo de fractura de partículas en molienda*



Nota: En los distintos sistemas de disgregación, las fuerzas aplicadas varían según el tipo de equipo y material. En las etapas intermedias de la reducción de tamaño, como el chancado y la trituración en conos o rodillos,

predomina la fuerza de compresión, mientras que en los impactores utilizados para minerales de menor dureza, la fragmentación se genera principalmente por impacto.

Fuente (Sepulveda, 1986): **(tipos de fractura según fuerza).**

Teorías de la conminución:

- **Principio de Rittinger (1867):** Esta afirmación señala que la energía requerida para reducir el tamaño de un material es proporcional al incremento de la nueva superficie generada. En otras palabras, considera la energía necesaria para fracturar un sólido ideal una vez que este ha superado su límite de resistencia o el umbral crítico de deformación.

$$E_R = K_R \left(\frac{1}{P_{80}} - \frac{1}{F_{80}} \right)$$

Donde:

E_R : Consumo de energía específica

K_R : Constante de Rittinger

P_{80} : Tamaño del producto con el 80 % de partículas que pasan (μm)

F_{80} : Tamaño de la alimentación con el 80 % de partículas que pasan (μm)

$$E_K = K_K \log \left(\frac{P_{80}}{F_{80}} \right)$$

- **Postulado de Kick (1867).** - Se planteó una segunda hipótesis que establece que la energía requerida para lograr una reducción de tamaño proporcional en cuerpos geoméricamente semejantes es directamente proporcional a su volumen. Kick señaló que la energía empleada en fracturar un material bajo una fuerza ideal no refleja por completo la totalidad de energía necesaria para debilitar el sólido hasta alcanzar su

punto de ruptura, sin considerar además la energía adicional demandada para producir la fractura final.

Donde:

E_K : Consumo de energía específico K_K : Constante de Kick

P_{80} : Tamaño 80 % pasante del producto (μm)

F_{80} : Tamaño 80 % pasante de la alimentación (μm)

- **Postulado de Bond (1952).** - La tercera hipótesis de reducción de tamaño plantea que, para disminuir el material en un ochenta por ciento, la energía consumida es proporcional a la raíz cuadrada del tamaño de las

partículas.

$$E_R = K_R \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

Donde:

E_B : Consumo de energía específico

K_B : Constante de Bond

P_{80} : Tamaño 80 % pasante del producto (μm)

F_{80} : Tamaño 80 % pasante de la alimentación (μm)

Se estableció el parámetro K_B en función del índice de trabajo (W_i), el cual representa la energía necesaria para el procesamiento del material. Este índice expresa la cantidad de energía, en kilovatios-hora por tonelada corta ($\text{kW}\cdot\text{h/ton}$ corta), requerida para reducir una tonelada corta de material desde un tamaño teóricamente infinito hasta partículas cuyo 80 % presente una granulometría inferior a 100 micrómetros (μm).

$$W_I = K_B \left(\frac{1}{\sqrt{100}} - \frac{1}{\sqrt{\infty}} \right) = \frac{K_B}{10}$$

Se deduce que:

$$K_B = 10 W_I$$

Finalmente, remplazado la ecuación tenemos:

$$W = W_I \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

Donde:

E_B : W = Consumo de energía específica (kW-h/Ton corta), para reducir un material desde un tamaño inicial F_{80} hasta un tamaño final P_{80} .

W_i : Índice de trabajo del material ((kW-h/Ton corta)

P_{80} : dP =Tamaño 80 % pasante del producto (μm)

F_{80} : dF =Tamaño 80 % pasante de la alimentación (μm).

2.2.5. Diseños experimentales

Según Alvarado, Huaynalaya (2023) el diseño de experimentos es una metodología estadística utilizada para identificar y cuantificar relaciones causales en investigaciones experimentales. Este enfoque se fundamenta en el control deliberado de una o más variables consideradas determinantes para evaluar su efecto sobre otra variable de interés. El diseño experimental define una secuencia específica de pautas que incluye las variables a modificar, la manera en que se aplicarán los cambios, el número de repeticiones del ensayo y el orden en que se ejecutarán. Además, este tipo de diseño busca proporcionar una base sólida que permita alcanzar un nivel de confiabilidad previamente establecido.

El diseño experimental se aplica en diversas disciplinas como la agricultura, la medicina, la ecología y las ciencias del comportamiento, entre otras. Este enfoque es esencial para el progreso de la investigación experimental, ya que permite establecer de manera clara la relación de causa y efecto entre las variables estudiadas.

La evaluación de la ley de cobre, orientada a optimizar el uso de los xantatos Z11 y Z6 durante el proceso de extracción, resulta fundamental para incrementar la eficiencia y el valor productivo de la planta concentradora. Mediante el diseño experimental es posible identificar las condiciones operativas óptimas que permiten una mayor recuperación de cobre, reduciendo al mismo tiempo el consumo de xantatos. Esta metodología facilita el ajuste y control de variables críticas del proceso, como la dosificación de reactivos y las condiciones de pH, con el propósito de analizar su influencia en la recuperación metálica. De este modo, se pueden establecer lineamientos precisos que aseguren un procedimiento más rentable y sostenible, garantizando tanto la calidad del resultado como una menor demanda de recursos.

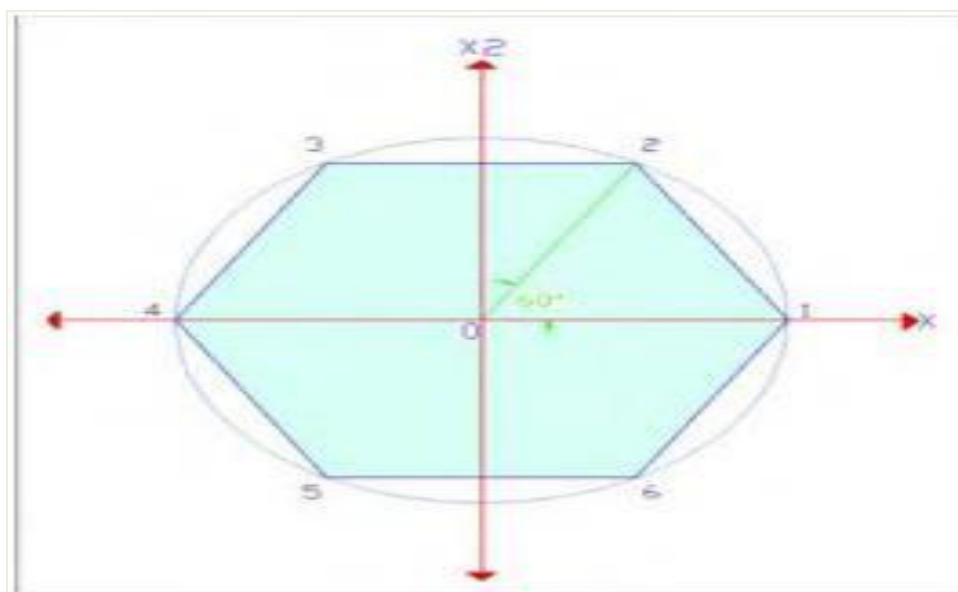
La aplicación del diseño experimental para optimizar el uso de xantatos permite comprender con mayor profundidad las relaciones entre las distintas variables del proceso. Este enfoque estadístico no solo facilita la determinación de los niveles adecuados para cada parámetro, sino que también aporta información valiosa sobre las interacciones existentes entre ellos. Esto resulta especialmente relevante en la flotación de minerales, donde múltiples factores pueden influir en la eficiencia de recuperación. Al emplear esta metodología, se fortalece la capacidad de tomar decisiones basadas en datos confiables, lo que favorece una optimización continua del proceso y una mejora en la calidad del

concentrado final. En última instancia, este enfoque contribuye significativamente al perfeccionamiento de las operaciones mineras y al desarrollo de prácticas más sostenibles en la industria.

2.2.6. Teoría del diseño hexagonal

Estos diseños de pruebas rotacionales distribuyen de manera uniforme la capacidad de estudio en todas las direcciones, partiendo de un punto central hacia distintas posiciones experimentales ubicadas a una distancia predeterminada. Este enfoque facilita la evaluación de un modelo de segundo orden, el cual contempla seis puntos experimentales dispuestos en forma de hexágono alrededor del centro, además de los ensayos centrales necesarios para calcular la magnitud de la desviación dentro de la experimentación.

Figura 5. Representación gráfica de diseño hexagonal



Nota: La representación gráfica permite disponer los puntos de prueba de manera equidistante en todas las direcciones a partir de un único punto central de experimentación. Este esquema, empleado para evaluar modelos de segundo orden, incluye seis puntos de ensayo distribuidos en un hexágono regular, además de los ensayos centrales necesarios para estimar la variabilidad del error experimental, tal como se aprecia en la figura correspondiente.

2.2.7. Reactivos de flotación

En la etapa de flotación de minerales se emplean tres categorías principales de reactivos: colectores, espumantes y modificadores.

- **Colector.** En los procesos de separación por flotación, los colectores suelen ser compuestos químicos solubles en agua que presentan grupos con polaridades opuestas. Estos reactivos poseen segmentos polares que se adsorben en la superficie del mineral; una vez fijados, las cadenas hidrofóbicas de su estructura confieren hidrofobicidad a la partícula mineral, facilitando su adhesión a las burbujas de aire. Los colectores pueden clasificarse según su funcionalidad o de acuerdo con el tipo de mineral que permiten recuperar. Se dividen en dos grandes grupos: no polares (o no ionizados) e iónicos. Los colectores no polares carecen de grupos polares y se emplean en la flotación de minerales con elevada afinidad natural por el agua, como la molibdenita, el grafito, el azufre y el carbón, entre otros. En contraste, los colectores iónicos contienen grupos funcionales polares de carácter hidrófilo, los cuales se orientan y fijan sobre las fases minerales mientras que sus fracciones no polares e hidrofóbicas se dirigen hacia la fase gaseosa. Al disolverse en agua, estos colectores pueden ionizarse en cationes o aniones. Dentro de los colectores iónicos se distinguen los de tipo catiónico y aniónico. Los primeros incluyen a los aminas, ampliamente utilizados en la industria, que en solución acuosa se disocian en cationes y aniones hidroxilo. Por su parte, los colectores aniónicos generan radicales que se unen a grupos polares para formar aniones, dejando cationes en el medio líquido. Estos últimos se subdividen en dos categorías principales: los de tipo sulfuro,

que comprenden xantatos, tiofosfatos y tiocarbamatos; y los de tipo carboxílico (ácidos grasos), entre los que se encuentran los sulfatos y sulfonatos.

- **Espumantes.** Se trata de mezclas de compuestos orgánicos con alta afinidad por el agua que actúan como agentes tensoactivos. En otras palabras, estos productos reducen la tensión superficial y se adsorben de manera preferente en la interfase aire-líquido. Esta propiedad favorece la formación de una espuma estable y la generación de burbujas de menor tamaño. Entre los representantes más comunes de este grupo se encuentran los poliglicoles, ácidos, alcoholes y aminas.
- **Modificadores.** Son reactivos elaborados para establecer condiciones que optimicen tanto el proceso de recolección como la selectividad. Estos reactivos se clasifican en tres categorías principales: activadores, depresores y reguladores de pH.

Los activadores son reactivos que incrementan la afinidad de los colectores por la superficie mineral o que mejoran su interacción con ella. Entre los ejemplos más comunes se encuentran los carbonatos de cobre y sodio, así como ciertos óxidos. Por otro lado, los depresores son reactivos que reducen la flotabilidad del mineral, ya sea al disminuir su hidrofobicidad o al inhibir la acción del colector. Dentro de este grupo se incluyen el sulfuro de sodio, los cromatos, los dicromatos y el cianuro de sodio o de calcio.

Finalmente, los reguladores de pH, como la cal viva (CaO), la cal hidratada (Ca(OH)_2), el carbonato de sodio (Na_2CO_3), la soda cáustica (NaOH) y el ácido sulfúrico (H_2SO_4), se emplean para ajustar el pH durante las operaciones de flotación industrial. Estos reactivos permiten modificar las condiciones del

medio, favoreciendo la máxima diferenciación y separación entre los distintos minerales.

2.2.8. Cinética de flotación

El modelo de flotación en modo batch, planteado por Paucar (2020) y formulado bajo un enfoque de tipo cinético, propone que el proceso de flotación puede evaluarse de manera análoga a una reacción química. Esta ecuación proporciona una base para comprender cómo interactúan las partículas minerales con las burbujas de aire a lo largo de la operación de flotación.

$$-\frac{dc}{dt} = k \cdot c^n$$

Donde:

C: la concentración de especies flotables.

N: orden de la reacción

k: constante específica de velocidad de flotación

Modelo de ecuación de recuperación con respecto al tiempo.

$$R_t = R_{\infty} \cdot (1 - e^{-kt})$$

distingamos el algoritmo matemático de García – Zúñiga

$$\ln\left(\frac{R_{\infty} - R_t}{R_{\infty}}\right) = -k \cdot t$$

R: recuperación acumulada para el tiempo t de flotación (%)

K: Constante cinética (1/min)

R_∞: Recuperación a tiempo infinito (%)

Corresponde al máximo rendimiento que es posible obtener del material o elemento de interés bajo las condiciones existentes.

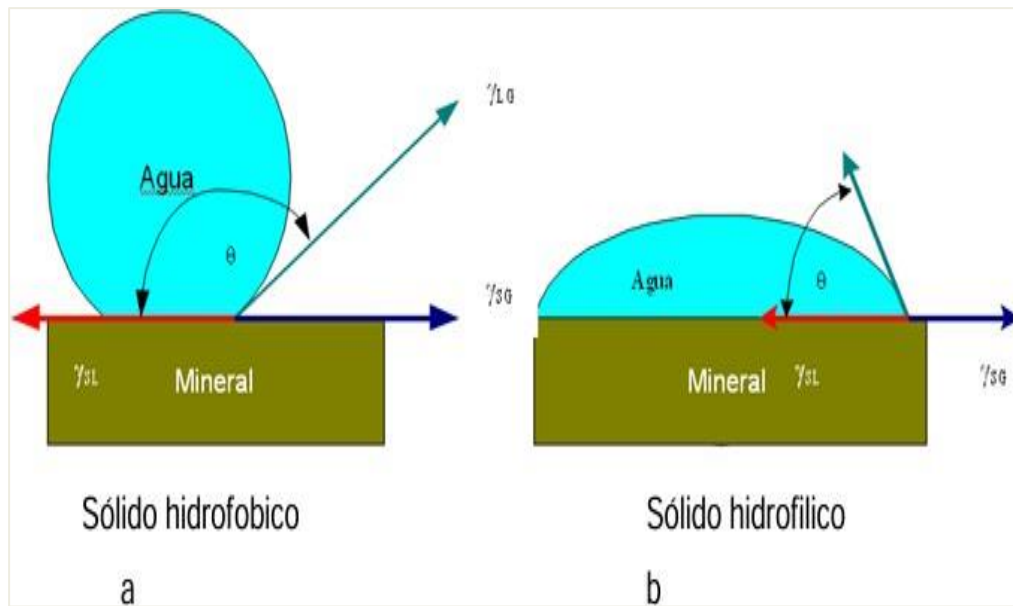
T: tiempo de flotación (min)

Los parámetros R y k varían para cada uno de los elementos que entran en flotación, como Fe, Cu, Pb y Zn. Estos valores dependen tanto de la etapa del proceso (por ejemplo, limpieza, recirculación, recuperación o scavenger) como de las características propias del mineral, tales como su tamaño de partícula y grado de liberación, así como de las condiciones operativas, entre ellas el pH, la naturaleza y dosificación de los reactivos, la velocidad de agitación, el flujo de aire y el diseño de la celda. Por ello, es fundamental determinar estos parámetros de manera específica para cada caso y tipo de mineral.

2.2.9. Ángulo de contacto

Según Zegarra (2016), resulta esencial comprender la relación entre el contenido de agua y la capacidad de flotación de un mineral. Cuando una partícula sólida presenta propiedades hidrofóbicas, ya sea de forma natural o por la adsorción de un colector en su superficie, la película líquida se retrae hasta que las tres tensiones superficiales alcanzan un estado de equilibrio. En este estado, se forma un ángulo entre las tensiones interfaciales, que puede describirse con la ecuación $\cos\theta\gamma_{lg} - \gamma_{sl} + \gamma_{sg} = 0$ en equilibrio, o, de forma equivalente, $\cos\theta\gamma_{lg} = \gamma_{sg} + \gamma_{sl}$. Esta relación es conocida como la ecuación de Young.

Figura 6. Esquema del ángulo de contacto



Nota: Indica dos figuras que se forma tensión superficial sólido y líquido. Si el ángulo es mayor a la superficie de contacto entre burbuja y solido va ser mayor entonces la fuerza de adhesión será mayor y las partículas será hidrofóbicas y si es menor las partículas será hidrofílico. Si mayor es la cadena de hidrocarburo de xantatos mayor va ser el ángulo de contacto que formara.

La ecuación de Young describe las condiciones de equilibrio termodinámico entre las tres fases involucradas e incorpora el concepto de hidrofobicidad. Este principio es fundamental en la etapa de flotación de minerales, ya que determina cómo las partículas minerales interactúan con las burbujas de aire durante el proceso de separación.

El ángulo de contacto (θ) se define como el ángulo formado entre la superficie de la interfase gas-agua en el punto donde convergen las tres fases. Este parámetro proporciona información clave sobre el grado de humectabilidad del material, lo que permite establecer las principales características de la superficie. Cuando un sólido se encuentra completamente humectado, el ángulo de contacto (θ) es de 0 grados. Un valor superior a 0° indica una humectabilidad parcial, y a

medida que el ángulo aumenta, la capacidad de mojado disminuye. Por lo tanto, un ángulo de contacto más elevado refleja un mayor nivel de hidrofobicidad.

No obstante, dentro de esta relación, solo es posible medir de forma experimental la tensión superficial del fluido, mientras que las tensiones interfaciales γ_{sg} y γ_{sl} no son medibles de esta manera.

2.2.10. El colector xantato isopropílico de sodio

(H., 2023) dice: Los colectores pueden fijarse a la superficie del mineral mediante fuerzas de Van der Waals entre las cadenas hidrocarbonadas, así como por adsorción física. Este mecanismo favorece la concentración de los reactivos en sitios específicos de la superficie mineral, lo cual resulta esencial para asegurar la eficiencia del proceso de flotación.

La discusión sobre el papel del oxígeno en la supresión de lamas resulta especialmente relevante. En el caso de la galena, cuyo principal compuesto superficial es el complejo de xantato de plomo (PbX_1), se ha comprobado que la presencia de oxígeno no ejerce una influencia significativa en el proceso. En contraste, para la pirita es esencial que el mineral experimente primero una oxidación que conduzca a la formación de dixantógeno, el cual constituye la especie predominante en su superficie. Bajo esta perspectiva, el oxígeno adquiere un papel determinante en el comportamiento del sistema.

La flotación de cobre es un proceso altamente especializado que depende de una adecuada liberación del mineral y de una eficiente adsorción de los colectores en su superficie. Estos colectores se fijan mediante fuerzas de Van der Waals entre las cadenas hidrofóbicas y la superficie mineral, contribuyendo de manera decisiva a la hidrofobicidad de las partículas. Esta propiedad facilita la

adhesión del mineral a las burbujas de aire durante la etapa de flotación, lo que favorece una recuperación selectiva de cobre y mejora la calidad del concentrado final. Además, la adsorción localizada de los reactivos en sitios específicos de la superficie mineral resulta esencial, ya que asegura interacciones químicas que optimizan la recuperación de cobre y disminuyen las pérdidas metalúrgicas.

La discusión sobre el papel del oxígeno en la descomposición del xantato es especialmente relevante en la separación de cobre, ya que los distintos minerales presentes en el yacimiento requieren condiciones específicas. Por ejemplo, en la flotación de galena, el oxígeno no es determinante para la formación del complejo de xantato de plomo, lo que simplifica el proceso. En cambio, en minerales como la pirita, es indispensable la oxidación previa que permita la conversión del xantato en dixantógeno, proceso que requiere la presencia de oxígeno. Estas reacciones subrayan la necesidad de establecer un plan experimental bien definido y un diseño de flotación adecuado para maximizar la recuperación de cobre. Comprender y controlar estos factores permite incrementar de manera significativa la eficiencia del proceso de flotación, logrando una mayor recuperación y una mejor calidad del concentrado final.

2.3. Definición de términos básicos

- **Efectividad:** Se entiende como la habilidad para alcanzar un resultado deseado o cumplir con un objetivo específico de manera eficiente.
- **Optimización del proceso:** Después de identificar las variables principales, se inicia un proceso de optimización utilizando métodos de diseño experimental, como el diseño hexagonal. Este enfoque permite establecer los valores ideales de las variables, con el fin de maximizar la recuperación de cobre que incluye plata.

- **Propiedad en el agua:** El abastecimiento de agua a menudo enfrenta importantes dificultades, lo que lleva a la práctica común de utilizar agua industrial o agua reciclada derivada del proceso, la cual puede incluir pequeñas cantidades de residuos de reactivos químicos.
- **Flotación:** Es un proceso de naturaleza fisicoquímica empleado para separar los minerales valiosos de aquellos sin valor económico. Este método se fundamenta en la adhesión selectiva de burbujas de gas a las partículas minerales suspendidas en un medio líquido.
- **Reactivo:** Se define como un compuesto químico empleado en una reacción para inducir un cambio en otra sustancia.
- **Reactivo de flotación:** Es un compuesto químico empleado en la etapa de flotación de minerales para separar las especies de interés económico de la ganga, la cual se encuentra mezclada con otros minerales sin valor.
- **Ley:** Son valores que expresan la ley o calidad de los minerales, reflejando el contenido de metales presentes en un concentrado o producto intermedio. Habitualmente, las menas de metales base se reportan en porcentaje, mientras que para metales preciosos como el oro y la plata se utilizan unidades como onzas por tonelada o gramos por tonelada.
- **Colector:** Se define como un compuesto químico utilizado para aumentar la capacidad de flotación de los minerales valiosos presentes en una suspensión mineral.
- **Recuperación:** Recuperación: La recuperación metalúrgica se refiere al porcentaje de minerales valiosos que se separan y concentran de manera efectiva de una suspensión mineral mediante el proceso de flotación. Este

parámetro resulta fundamental para evaluar la eficiencia del proceso de flotación y, por lo general, se expresa como un valor porcentual.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

El uso optimizado de xantatos Z11 y Z6 influye significativamente en la mejora de la eficiencia en la recuperación de cobre, según los resultados obtenidos mediante diseño experimental en la planta concentradora de Pan American Silver - Huarón S.A., Pasco 2024.

2.4.2. Hipótesis específica

- a. El consumo de diferentes proporciones de xantatos Z11 y Z6 influye significativamente en la recuperación de cobre, según los resultados obtenidos en los ensayos metalúrgicos realizados en la planta concentradora de Pan American Silver Huarón S.A., Pasco 2024.
- b. Existe una relación significativa entre la granulometría del mineral de cobre y la eficiencia del uso combinado de xantatos Z11 y Z6 en la recuperación metalúrgica, evidenciada mediante análisis de tamaño de partícula y flotación selectiva.
- c. La optimización de los tiempos de acondicionamiento de los reactivos de flotación mejora significativamente la recuperación de cobre al utilizar xantatos Z11 y Z6 en la planta concentradora de Pan American Silver Huarón S.A., Pasco 2024.

2.5. Identificación de variables

2.5.1. Variable independiente

El consumo de xantatos Z11 y Z6.

2.5.2. Variable dependiente

La recuperación metalúrgica de cobre.

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Tabla 1. Dimensiones e indicadores de las variables de investigación operación

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Consumo de xantatos Z11/Z6.	La cantidad de reactivo colector agregado durante el proceso de flotación.	Se mide con la dosificación aplicada en gramos por toneladas (g/t) y la proporción de Z11 y Z6.	<ul style="list-style-type: none"> Dosificación de reactivos. Proporción de Z11 y Z6. 	<ul style="list-style-type: none"> g/t de xantatos utilizado. % de Z11 % de Z6 aplicado.
Recuperación de cobre	Porcentaje del metal de cobre interés (Cu)	Calculara el % de cobre recuperado por análisis químico ley de concentrado y del relave.	<ul style="list-style-type: none"> Eficiencia metalúrgica. Calidad de concentrado. Relación CC/RLV 	<ul style="list-style-type: none"> % de recuperación Cu. % ley de Cu en concentrado. % de Cu en relave
Condiciones operacionales	Parámetros de operación.	pH, tiempo de flotación, P_{80}	<ul style="list-style-type: none"> pH de la pulpa. Tiempo de flotación. Granulometría de molienda. 	<ul style="list-style-type: none"> Valor de pH Tiempo de resistencia (min) P_{80} (μm)

Nota: La tabla muestra cómo las variables de estudio actúan de forma individual o parcial dentro del proceso analizado. Indicadores fueron definidos base a la literatura metalúrgica (Finch, 2016) (Lopez, 2019) Y adaptadas a las condiciones de la unidad minera Huaron (2024)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

El presente documento expone una investigación de carácter aplicado realizada en un laboratorio de metalurgia, cuyo propósito es analizar el efecto de las variables independientes y dependientes en la etapa de flotación bulk.

3.2. Nivel de investigación

Estos proyectos se clasifican como investigación **Experimental**.

3.3. Métodos de investigación

La investigación se considera una forma esencial de aprendizaje en la pedagogía activa, como indica Dewey (2010) en su obra *¿Cómo pensamos?* A través de la investigación, se genera nuevo conocimiento y se adquiere experiencia en la resolución de problemas, además de desarrollar habilidades en la gestión de proyectos. Para realizar estos procesos de manera efectiva, se sugiere llevar a cabo estudios de campo, trabajo en laboratorio y análisis detallados de los resultados. Este enfoque integral es parte de un método de investigación que

prioriza la práctica directa y la aplicación de teorías y conceptos en situaciones reales. La investigación es de carácter **aplicada y cuantitativa**.

3.4. Diseño de investigación

El diseño de investigación propuesto para este análisis es de tipo experimental. Este enfoque se basa en la manipulación deliberada de la variable independiente —en este caso, el consumo de xantatos— con el objetivo de evaluar su efecto sobre la variable dependiente, correspondiente a la recuperación de cobre, bajo condiciones controladas.

La gestión de estas variables dentro del estudio permite aplicar un diseño experimental con configuración hexagonal, el cual incorpora réplicas estandarizadas como estrategia para abordar y resolver el problema identificado.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población de estudio corresponde al yacimiento de mineral de cobre perteneciente a la empresa minera Huarón, aunque para el muestreo se tomará en cuenta únicamente la población definida en el marco del presente análisis.

Tabla 2. Reservas y Recursos minerales de la mina Huarón, 30 de junio de 2024 (Pan American Silver)

Nombre y Cantidad		Grado				Contenido metálico			
Nombres	Toneladas (Mt)	Plata (Ag) g/t	Cobre (Cu)%	Plomo (Pb)%	Zinc (Zn) %	Plata (Moz)	Cu (kt)	Pb (kt)	Zn (kt)
Reservas P&P	9,7	169	0,45	1,79	3,22	52,6	44	173	312
Recursos M&I	3,1	176	0,41	1,75	3,26	17,7	13	55	102
Recursos Inferidos	5,2	165	0,33	1,73	3,07	27,5	17	90	160

Nota: Datos obtenidos de Pan American Silver, Huarón- sección técnicas y reservas; al 30 de junio del 2024.

La población de este estudio está constituida por el conjunto de minerales de cobre procesados en el circuito de flotación de la Planta Concentradora de la compañía minera Huarón S.A., ubicada en la provincia de Pasco. En particular, se considera como población a los lotes de mineral que ingresan a la planta durante el año 2024, los cuales presentan características representativas de la matriz mineralógica tratada en condiciones operativas normales.

Dichos minerales contienen principalmente especies de cobre como calcopirita y bornita, con presencia de ganga, silicatada y sulfuros de plomo y zinc, lo que los hace apropiados para estudios de flotación selectiva una cantidad de muestra de 200 kg. Esta población representa el universo de estudio sobre el cual se evaluará el comportamiento del consumo de los colectores xantato Z11 y Z6 mediante diseño experimental.

3.5.2. Muestra

Según Morles (1994), una muestra es una fracción que refleja las características esenciales del conjunto del cual se extrae, por lo que debe ser representativa de la población de origen. En consecuencia, la confiabilidad de la investigación depende tanto del procedimiento de muestreo como de la dimensión de la muestra seleccionada. Por ello, la correcta elección y el tamaño adecuado de la muestra constituyen factores determinantes para la validez de los resultados del estudio.

Para obtener una muestra representativa, se efectuaron cortes sucesivos a partir de una bolsa inicial de 200 kilogramos hasta alcanzar un submuestreo de 50 kilogramos. Posteriormente, se aplicaron los métodos de recolección que incluyen la extracción del mineral desde su ubicación, su separación mediante el divisor de Jones y el posterior pesado del material, hasta obtener una cantidad de un kilogramo por cada ensayo programado en el laboratorio dentro del diseño experimental.

La muestra fue obtenida mediante muestreo sistemático y compuesto en la cancha de mineral de grueso de la planta, con el objetivo de asegurar una representación homogénea del mineral sulfurado de cobre alimentado al circuito de flotación. Se tomaron submuestras de distintos puntos de acopio, las cuales fueron combinadas, homogenizadas y posteriormente reducidas mediante el método de cuarteo hasta alcanzar el peso requerido para la ejecución de las pruebas metalúrgicas.

Se prepararon 10 unidades experimentales (pruebas batch) para aplicar un diseño experimental factorial 2^3 más dos puntos centrales replicados, donde se

evaluaron los efectos del xantato Z11 y xantato Z6. Cada unidad de prueba fue realizada bajo condiciones controladas en el laboratorio metalúrgico.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos incluye todo el proceso, que va desde el comienzo del muestreo hasta la finalización de la investigación, abarcando de manera completa todos los datos pertinentes requeridos para abordar el problema planteado.

3.6.1. Técnicas

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo–experimental, empleando pruebas metalúrgicas controladas en laboratorio. Se aplicó un procedimiento de experimentación directa mediante un diseño factorial 2^3 , para evaluar el efecto de las variables independientes —dosificación de xantato Z11, xantato Z6 y pH— sobre la variable dependiente, correspondiente a la recuperación de cobre.

Todas las pruebas se realizaron de manera uniforme con el fin de asegurar la confiabilidad y repetibilidad de los datos obtenidos. Los resultados fueron registrados de forma sistemática en hojas de control y planillas de cálculo, para posteriormente ser sometidos a un análisis estadístico detallado.

3.6.2. Instrumentos

Los equipos empleados para la obtención de datos incluyeron celdas de flotación de laboratorio marca Denver, utilizadas para ejecutar ensayos que requieren aireación, agitación y control de tiempos en el proceso de flotación. Balanza electrónica analítica: Para pesar con precisión las muestras y reactivos, con una sensibilidad de 0,01 g. pH-metro digital: Para medir y ajustar el pH de la pulpa durante las pruebas metalúrgicas. Estufa de secado: Para secar los

concentrados y relaves obtenidos antes del pesaje final. Bomba peristáltica y buretas: Para dosificar con precisión los reactivos (Z11 y Z6). Planillas de registro técnico y hojas de cálculo Excel: Para registrar la masa de alimentación, masa de concentrado, recuperación, ley de cobre y condiciones de operación en cada prueba. Equipos de análisis químico (AAS o ICP): Para establecer el contenido de cobre tanto en el concentrado como en el relave, se procedió conforme a la disponibilidad de los recursos y equipos del laboratorio.

3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Al seleccionar las técnicas para el procesamiento y análisis de datos, es fundamental tener en cuenta el tipo de resultados que se esperan y la capacidad para interpretar y analizar los datos generados en el laboratorio. Este proceso implica obtener valores representativos que se evalúan en función de las relaciones causa-efecto, en consonancia con los objetivos establecidos y las variables independientes y dependientes definidas. Además, la eficacia del análisis depende del tiempo de respuesta y del estado de los datos a examinar, aspectos que se determinan a partir de los ensayos llevados a cabo en el laboratorio. Si los resultados no son satisfactorios, será necesario repetir las pruebas en el laboratorio hasta conseguir una respuesta que confirme la hipótesis formulada (wellington, 200).

El procesamiento y presentación de los datos se realizará empleando el modelo hexagonal como base matemática para interpretar la interacción de las variables específicas contempladas en las hipótesis del estudio. Para efectuar estos cálculos se utilizará una hoja de trabajo en Excel.

3.8. Tratamiento estadístico

En este estudio, se aplicará la técnica de estadística descriptiva para analizar los datos, organizándolos en tablas que faciliten su comparación y ordenación. Esto permitirá identificar los parámetros de la muestra utilizada. Además, se realizará el conteo correspondiente y se efectuarán cálculos mediante tablas, que serán analizadas e interpretadas para obtener resultados significativos (wellington, 200).

3.9. Orientación ética filosófica y epsitémica

En el contexto universitario, la investigación se reconoce como una actividad esencial que fomenta el pensamiento lógico y creativo, lo que a su vez facilita la creación y acumulación de conocimientos útiles para resolver problemas en diferentes campos. Esta actividad científica no solo impacta la ética y los valores que orientan la investigación tanto en el ámbito académico como fuera de él, sino que también promueve el respeto por los autores mediante citas bibliográficas apropiadas y la ejecución de trabajos relacionados con la evaluación de la efectividad de los colectores (Belmont, 1979).

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

La zona de Huayllay, ubicada en el centro de los Andes peruanos, se caracteriza por una compleja mineralización hidrotermal que se presenta en vetas con orientaciones predominantes N-S, NW-SW y E-W, además de cuerpos de reemplazo que sustituyen las rocas sedimentarias. Los fluidos hidrotermales se originan a partir de intrusiones en calizas, las cuales han sido evaluadas de manera preliminar. Entre los minerales de mayor interés económico destacan la tenantita y la tetraedrita, ambas con alto contenido de plata, así como esfalerita, galena y calcopirita. La plata también se encuentra en forma de pirargirita, proustita, polibasita y pearceita, mientras que en la parte central del yacimiento Huarón es posible identificar enargita. Los minerales de ganga más comunes incluyen pirita, cuarzo, rodocrosita y calcita.

La investigación se llevó a cabo siguiendo con rigor los siguientes procedimientos: la muestra se tomó del material resultante del chancado final del mineral de cobre travieso, utilizado como alimentación para el molino primario.

Este material fue meticulosamente compuesto por las guardias, quienes se aseguraron de que la muestra representara adecuadamente la composición del mineral procesado. La etapa de muestreo y composición es fundamental para asegurar la representatividad y precisión en el análisis posterior, lo que permite una evaluación confiable de las características del mineral y la efectividad del procesamiento.

El proceso avanza con el secado y chancado de la muestra, garantizando que se procese hasta alcanzar una finura del 100% al pasar por una malla de -6 ASTM. En primer lugar, la muestra se seca de manera exhaustiva para eliminar cualquier humedad que pueda influir en los resultados del análisis. Luego, se realiza el chancado, donde se reduce el tamaño del material hasta que toda la muestra logra pasar a través de una malla de apertura -6 ASTM. Este procedimiento es crucial para lograr una homogeneidad en el tamaño de las partículas, lo que permite un análisis preciso y representativo del material mineralizado.

Se realiza el proceso de homogenización y cuarteo de la muestra para preparar el material destinado a los ensayos químicos. Durante la homogenización, la muestra se mezcla cuidadosamente para garantizar una distribución uniforme de los minerales y prevenir cualquier sesgo en los resultados. Este paso es fundamental para que el análisis químico represente con exactitud la composición general del material. La muestra se cuarteo, dividiéndola en fracciones más pequeñas y manejables, asegurando que cada porción sea representativa del total. Estas fracciones se utilizarán para obtener la ley de cabeza del mineral, analizando la concentración de elementos como plata (Ag), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), hierro (Fe), arsénico (As), antimonio (Sb),

manganeso (Mn), bismuto (Bi) y cobre en su forma oxidada (CuOx). Este análisis químico es esencial para evaluar la calidad y el valor del mineral procesado.

Se lleva a cabo la determinación del work index comparativo para el mineral y el cuarzo, realizando mediciones en dos momentos específicos: al inicio del proceso y a los diez minutos. El work index es un indicador fundamental que cuantifica la energía necesaria para triturar el material en un molino, ofreciendo una referencia sobre su dureza y su resistencia al chancado.

Con el fin de establecer el tiempo óptimo de molienda requerido para lograr una finura del 60% que pase a través de una malla de -200 ASTM en el circuito de cobre, se realizan ensayos utilizando cuatro intervalos de tiempo de molienda: cero minutos, 10 minutos, 15 minutos y 20 minutos. En cada intervalo, se cuantifica la cantidad de material que satisface la especificación de la malla -200 ASTM, lo que permite analizar la variación de la finura del producto en función del tiempo de molienda.

Seguidamente, se lleva a cabo la calibración del potenciómetro, un procedimiento fundamental para asegurar la exactitud en la medición del pH. Este proceso se realiza de manera cuidadosa, utilizando soluciones estándar de pH conocidas. En primer lugar, se enjuaga el electrodo del potenciómetro con agua destilada para eliminar posibles contaminantes. Posteriormente, el electrodo se sumerge en una solución estándar de pH, y se ajusta el potenciómetro hasta que la lectura corresponda con el valor conocido de dicha solución. Este procedimiento se repite con varias soluciones estándar de diferentes valores de pH para garantizar una calibración precisa en un rango amplio. Una calibración correcta del potenciómetro es esencial para obtener mediciones exactas y

confiables del pH, lo que resulta vital para el control y la optimización de los procesos químicos y mineralógicos.

Se lleva a cabo la preparación de los reactivos en diferentes concentraciones, cumpliendo estrictamente con los estándares establecidos por la planta concentradora. Este procedimiento consiste en formular soluciones con concentraciones específicas que se ajustan a los requerimientos operativos y analíticos de la planta.

Durante la fase de cinética de flotación se empleó un contenedor con capacidad de 2 L para realizar ensayos en una celda de flotación de 1 L. Este procedimiento tiene como objetivo evaluar el comportamiento metalúrgico del mineral bajo distintas condiciones de flotación. Se realizan pruebas con tiempos de contacto específicos que incluyen 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 y 5,0 minutos, tanto en la cinética de flotación como en el diseño experimental centrado en la recuperación de cobre.

Una vez que los productos del proceso de flotación han sido obtenidos y secados, se envían al laboratorio químico para realizar los ensayos químicos necesarios. Estos análisis son esenciales para determinar la composición exacta de los productos y evaluar la eficacia del proceso de flotación. La información recopilada de estos ensayos químicos es crucial para elaborar el balance de cinética de flotación, un análisis exhaustivo que ofrece detalles sobre las tasas de recuperación de los diversos minerales y la efectividad general del proceso.

Se efectúa una nueva prueba de flotación por lotes con el fin de preparar briquetas de concentrados de cobre, las cuales serán sometidas a un análisis detallado utilizando microscopía óptica. Este análisis facilita la identificación de minerales mixtos, inclusiones, asociaciones y minerales libres en las briquetas. A

través de la microscopía óptica, se obtiene una visión precisa de la composición mineralógica de los concentrados, lo que contribuye a evaluar la calidad y pureza de los productos obtenidos, así como a comprender la efectividad del proceso de flotación en la extracción y purificación de los minerales deseados.

Se lleva a cabo la prueba de flotación por lotes (Batch) utilizando una celda de flotación de 4,1 litros. Para esta prueba, se utilizan dos kilos de muestra y se establece una proporción de sólidos del 32,5%. Se aplican los reactivos estándares, siguiendo las cantidades establecidas en el proceso. Este procedimiento resulta esencial para evaluar la eficiencia del proceso de flotación en condiciones controladas, proporcionando datos clave que facilitan la optimización del método y el incremento en la recuperación de los minerales de interés.

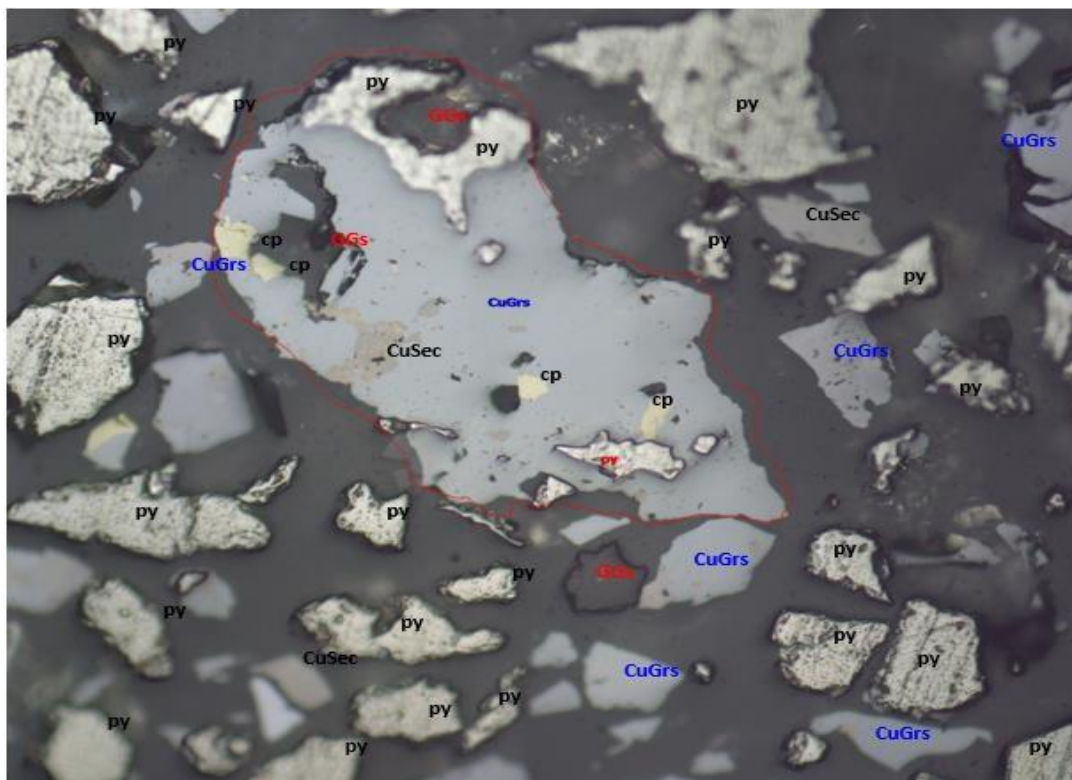
Una vez que los productos de flotación han sido obtenidos y secados, se envían al laboratorio químico para llevar a cabo los ensayos pertinentes. Los resultados de estos análisis son cruciales para elaborar el balance metalúrgico batch proyectado. Dicho balance proporciona una evaluación detallada del rendimiento del proceso de flotación, facilitando la determinación de la eficacia en la recuperación de minerales y permitiendo ajustes en los parámetros operativos para optimizar tanto el procesamiento como la calidad del concentrado final.

4.1.1. Estudio de microscopia

Se realizaron análisis de microscopía óptica empleando muestras del concentrado de cobre. Para ello, la muestra flotada se deslamó a una malla de +400, se secó, se homogeneizó y se pesó en 15 gramos, lo que permitió la

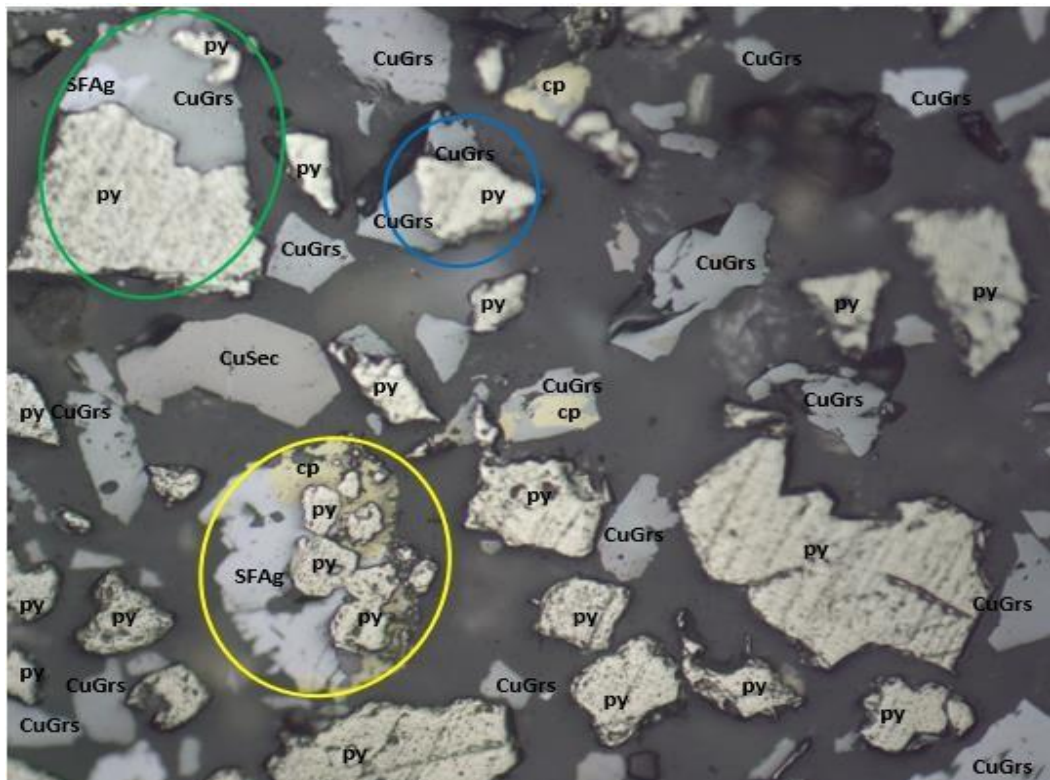
elaboración de briquetas que posteriormente fueron pulidas para su análisis microscópico.

Figura 7. *Concentrado cobre malla +400*



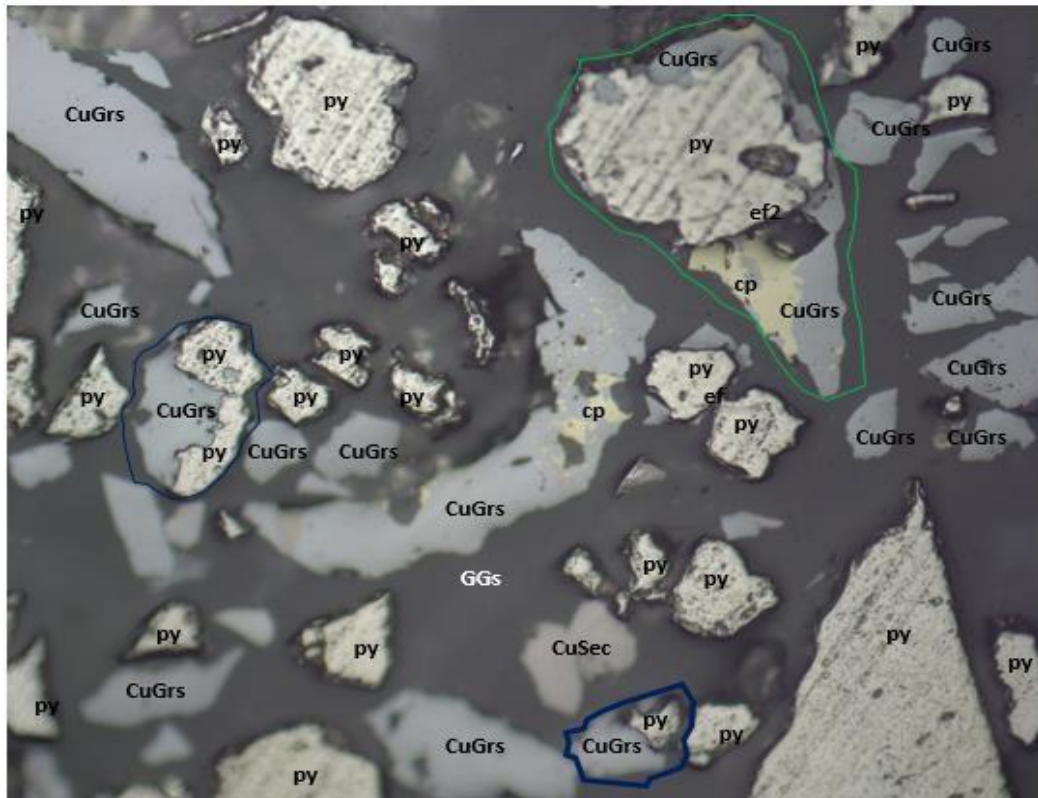
Nota: La imagen proporcionada, se observa dentro del área delimitada en rojo, una partícula mixta que incluye cobre gris, pirita, calcopirita, cobre secundario y gangas, identificadas respectivamente como (**CuGrs, py, cp, CuSec y GGs**). Además, al completar la visualización de la imagen, se aprecia una notable predominancia de partículas libres de pirita (**py**), cobre gris (**CuGrs**) y ganga (**GGs**). Esta distribución sugiere una composición mineralógica específica en el área analizada, destacando la presencia significativa de estas fases minerales individuales en comparación con otras fases presentes en la muestra.

Figura 8. *Concentrado cobre malla +400*



Nota: Se identifican varias partículas mixtas en distintas áreas de interés. Dentro del área delimitada en amarillo, se observa una partícula mixta compuesta por sulfosal de plata, pirita y calcopirita, que se denotan como **SFAg/py/cp**. En el área azul, se encuentra una partícula mixta formada por cobre gris y pirita, identificada como **CuGrs/py**. En el área verde, se visualiza una partícula mixta que incluye pirita, cobre gris y sulfosal de plata, representada como **py/CuGrs/SFAg**. La presencia de estas partículas mixtas sugiere la necesidad de optimizar los grados de liberación del proceso de separación. Además, al completar la observación, se destacan partículas libres de sulfosal de plata, cobre gris (**CuGrs**), cobre secundario (**CuSec**) y pirita (**py**), lo que indica una distribución variada de las fases minerales en la muestra y sugiere áreas potenciales para mejorar la eficiencia en la separación de minerales.

Figura 9. *Concentrado cobre malla +400*



Nota: Se observa diferentes tipos de partículas distribuidas en áreas específicas. Dentro de las áreas destacadas en azul, se identifica una presencia notable de partículas compuestas por cobre gris y pirita, denotadas como CuGRs/py. En el área verde, se visualiza una partícula mixta que contiene pirita, cobre gris y calcopirita, representada como py/CuGRs/cp. Al completar el análisis de la imagen, se destaca una abundante presencia de cobre gris (CuGRs) en la muestra. Sin embargo, la significativa presencia de pirita no liberada (py) se identifica como el principal factor responsable de la dilución en la ley del concentrado, lo que afecta de manera negativa tanto la calidad del producto final como la eficiencia del proceso de concentración.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.2.1. Determinar el efecto del consumo de xantatos Z11 y Z6

Ensayes químicos

A continuación, se ofrece una descripción de la ley de cabeza para cada uno de los elementos.

Tabla 3. *Ensayes químicos de una ley de cabeza*

<i>Ag g/t</i>	<i>Cu %</i>	<i>Pb %</i>	<i>Zn %</i>	<i>Fe %</i>	<i>As %</i>	<i>Mn %</i>	<i>Bi %</i>	<i>Sb %</i>
<i>108,22</i>	<i>0,20</i>	<i>1,57</i>	<i>2,44</i>	<i>8,88</i>	<i>0,02</i>	<i>7,19</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>

Nota: Leyes de cabeza de los recursos inferidos de la mina Huarón.

Los hallazgos del análisis de la muestra de mineral compósito indican que la concentración de plata es de 108,22 g/t, alta ley típica en minería polimetálica, tanto que el contenido de cobre se sitúa en un 0,20% aunque relativamente bajo comparado con el metal principal, sigue siendo significativo en el producto final. El plomo se encuentra en una concentración del 1,57%, y el zinc tiene un contenido del 2,44% indica un buen contenido económico. Estos valores proporcionan una visión clara de la composición del mineral, destacando la predominancia de plata y cobre en la muestra.

El hierro tiene un valor notablemente alto de 8,88%, lo que sugiere una presencia significativa en el mineral. Finalmente, el contenido de arsénico es del 0,02%, un nivel que se considera bajo y no debería afectar negativamente el rendimiento metalúrgico del proceso.

Condiciones de flotación

Para llevar a cabo ensayos de cinética de flotación, es imprescindible diseñar un experimento que considere las variables críticas, como la concentración y el tipo de reactivos (colectores, espumantes, depresores), el pH de la pulpa, la velocidad de agitación y el tamaño de partícula del mineral. El procedimiento comprende la preparación de la pulpa, la adición de los reactivos y la ejecución de la flotación bajo condiciones previamente establecidas.

Durante el ensayo se recolectan muestras de igual volumen para evaluar la recuperación y la consistencia del mineral presente en el concentrado. Los datos obtenidos se analizan para elaborar curvas de recuperación y aplicar modelos matemáticos que describan el comportamiento de la flotación, lo que permite optimizar el proceso y mejorar la eficiencia en la recuperación del mineral.

Condiciones de la prueba flotación batch

Se detallan las condiciones experimentales empleadas en los análisis metalúrgicos, incluyendo el tiempo de acondicionamiento de los reactivos, el período de molienda, el valor de pH, la distribución granulométrica y otros parámetros relevantes. Estos parámetros fueron controlados rigurosamente para evaluar el efecto del consumo de xantatos Z11 y Z6 en la recuperación del cobre, asegurar la validez de los resultados.

Tabla 4. *Condiciones de flotación batch*

Nombre:	Reactivos g/t					
	Tiempo (min)	pH	NaCN	Z-11/Z-6	Cal	150
Molienda	16,57	7,35				
Ro-Cu	4	11.5	50	30	3000	40
Scv-Cu-I	3			20		10
Scv-Cu-II	1			10	400	
I Cl Cu	1	11,5	10		400	
II Cl Cu	3	11,7			800	
Ac Cu I°	2					
Ro Cu	3	11,7		30		20
Scv-Cu I	2			10		20
Scv- Cu II	1			10		
I°Cl Cu	0,5	11,5	10		200	
Total, de reactivos en g/t			70	110	4800	90

Nota: Balance Metalúrgico a escala de laboratorio.

Para las pruebas metalúrgicas a escala de laboratorio, se ha determinado un tiempo de molienda de 16,57 minutos con el fin de alcanzar un 60% de malla - 200. Los reactivos empleados en el proceso comprenden cianuro de sodio (NaCN) y una mezcla de xantatos al 1%, además de cal, que se prepara a una concentración del 10%, y el H-150 al 100%. Se utiliza un consumo de cianuro de sodio de 70 g/t para regular el proceso de flotación.

La utilización de cal es notablemente alta, alcanzando 4800 g/t, debido a la elevada ley de hierro en la ley de cabeza. De manera similar, el consumo de

xantatos es de 110 g/t, lo cual se relaciona con la alta ley de cabeza presente. Estos altos consumos reflejan las características específicas del mineral procesado y la necesidad de ajustes en los reactivos para optimizar el rendimiento de la flotación.

4.2.2. Examinar la correlación entre el tamaño de las partículas del mineral

Determinación de tiempo de molienda

Se realizaron pruebas de molienda utilizando 1000 gramos de muestra junto con 500 c.c de agua, lo que generó una pulpa con un 67% de sólidos. Posteriormente, se efectuó un análisis granulométrico con el propósito de comprobar el grado de molienda alcanzado. Para establecer la finura del 60% en malla -200, se ejecutaron cuatro pruebas en diferentes intervalos de tiempo: 0, 10, 15 y 20 minutos, dirigidas específicamente al circuito de cobre.

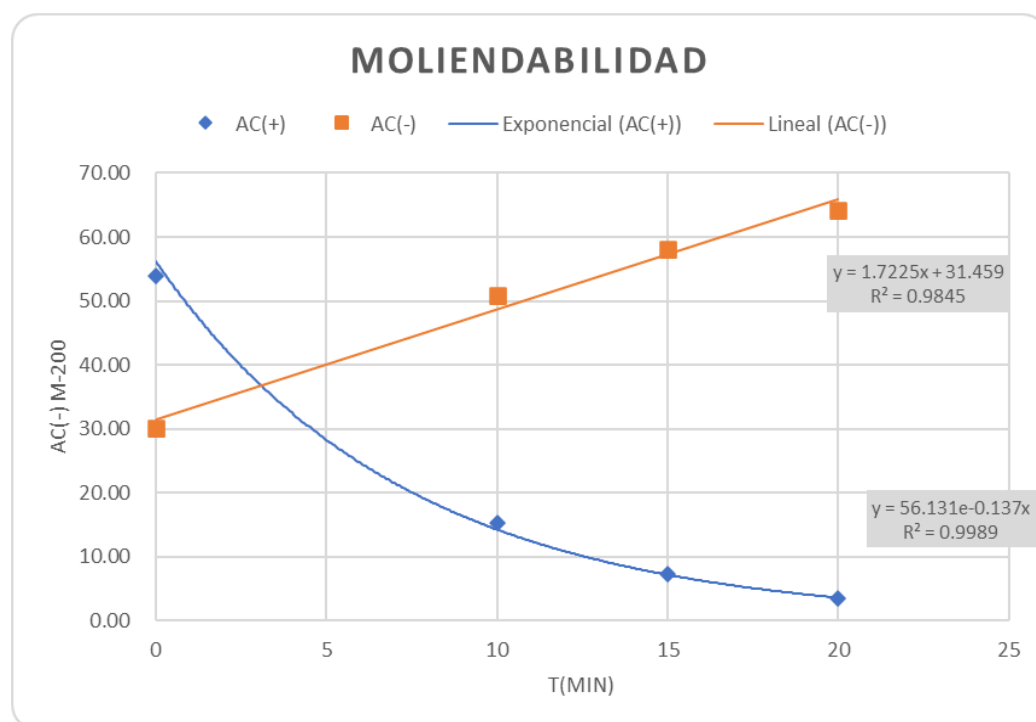
La muestra fue sometida a trituración en un molino de 8,58" x 11,22" utilizando una carga de bolas metálicas de 20 000 gramos. Este procedimiento, cuidadosamente controlado, permite una medición precisa de la capacidad de molienda y facilita la realización de ajustes en las condiciones operativas para optimizar la producción de concentrado de cobre. Los resultados obtenidos en los cuatro intervalos de tiempo evaluados, empleados para identificar el tiempo de molienda más adecuado, se presentan en la tabla correspondiente.

Tabla 5. Tiempo óptimo de molienda de mineral 60% m-200 malla = 16,57 minutos

Tiempo de Molienda	m-200	m +65
	Ac (-)	Ac (+)
0	30.14	53.86
10	50,95	15.32
15	58.03	7.33
20	4.22	3.44
16,57	60	6.04

Nota: El tiempo optimo se selecciona al alcanzar 60% -200, confirmar con flotación batch, confirmando la mayor recuperación Cu sin sobre-molienda.

Figura 10. Curva de moliendabilidad



Nota: La grafica muestra la curva % pasante vs tiempo y marca el tiempo óptimo.

Una vez obtenidos los datos de molienda, se procede a determinar la relación entre el tiempo de molienda y el porcentaje de material que atraviesa la

mallas -200. El análisis de estos datos indica la existencia de una relación lineal, la cual se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$y = 1,7225x + 31,459$$

Se determinó que el tiempo óptimo de molienda es de 16,57 minutos, necesario para lograr que el 60 % del material atraviese la malla -200. Este intervalo es crucial para iniciar las pruebas de separación de cobre bajo condiciones controladas de molienda, asegurando que las operaciones de trituración sean adecuadas para una evaluación precisa de la capacidad del proceso.

Determinación del work index comparativo

Para evaluar la dureza del mineral se aplicó el método de comparación con el cuarzo, el cual presenta un índice de trabajo de 13,6 kWh/t. En el estudio se determinó el tamaño medio de alimentación F_{80} para el conjunto de muestras, correspondiente a la abertura de malla por la que pasa el 80 % del material a través de una malla ASTM N.º 6, así como la granulometría del producto P_{80} obtenida después del proceso de molienda.

$$F_{80} \text{ cuarzo} = 1442 \text{ micrones (100\% malla -6)}$$

$$P_{80} \text{ cuarzo} = 258 \text{ micrones,}$$

$$F_{80} \text{ mineral} = 1131 \text{ micrones (100\% malla -6),}$$

$$P_{80} \text{ mineral} = 184 \text{ micrones}$$

La ecuación de Bond, utilizada para estimar el consumo de energía en los procesos de reducción de tamaño de minerales, se expresa de la siguiente manera:

$$13.6 \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80} \text{ cuarzo}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80} \text{ cuarzo}}} \right) = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80} \text{ mineral}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80} \text{ mineral}}} \right)$$

La fórmula utilizada en el método comparativo incorpora el valor de 13,60 kWh/t, correspondiente a la dureza del cuarzo. Al reemplazar este valor en la ecuación de Bond, se determinó el índice de trabajo del mineral, obteniéndose el siguiente resultado.

$$W_i = 10,96 \text{ Kwh/Tc o } 12,08 \text{ kWh/Tm.}$$

Este índice de trabajo se utiliza como indicador de la dureza del mineral, clasificándolo como de dureza media.

Tabla 6. *Clasificación del índice de trabajo (W_i) en función de la dureza del mineral*

Descripción	Limite W_i (K wh/TM)
Muy blando	7,26
Blando	7,26 -10,89
Medio	10,89- 14,51
Duro	14,51 -18,14
Muy duro	18,14- 21,77
Extremadamente duro	21,77

Nota: El índice de trabajo (W_i) de Bond representa la energía, expresada en kWh por tonelada, requerida para disminuir el tamaño de una tonelada de mineral hasta lograr que el 80 % del material atravesase una malla de 100 μm .

El índice de trabajo (W_i), también denominado trabajo en condiciones estándar de laboratorio, constituye un parámetro esencial en los estudios de conminución, ya que permite estimar la energía requerida para reducir el tamaño del mineral hasta un grado de finura específico bajo condiciones controladas de laboratorio. En esta investigación, se incluye el cálculo del work index para:

Determinar la eficiencia del proceso de molienda del mineral sulfurado de cobre en función de las condiciones operativas de la planta. Determinar si el tiempo de molienda seleccionado (16,57 minutos) es energéticamente coherente con la naturaleza del mineral tratado. Comparar la dureza relativa del mineral frente a otros tipos de mineral tratados en la Planta Concentradora Huarón. Asegurar que la finura del 60% malla -200 se alcanza con un consumo energético razonable y controlado, evitando sobre molienda o submolienda, que afecten la recuperación en flotación.

4.2.3. Mejorar los tiempos y las condiciones de preparación de los

reactivos

Propuesta de las variables ajustables para la creación del diseño hexagonal

Propuesta de las variables controlables para la formulación del diseño Hexagonal se refiere a la identificación y selección de los factores que pueden ser manipulados o ajustados deliberadamente dentro de un experimento o proceso con el fin de evaluar su impacto en los resultados o respuestas.

En un diseño experimental hexagonal, que es un tipo de diseño central compuesto, las variables controlables se distribuyen en un espacio experimental hexagonal, permitiendo examinar sus efectos y las interacciones entre ellas de manera sistemática.

Estas variables son clave en la optimización y el análisis de procesos, ya que su correcta selección y control permiten obtener resultados precisos, mejorando la calidad y eficiencia del proceso en estudio.

Tabla 7. Presentación de las variables y rangos

Variable	Reactivo	Unidad	Rango Real		
X_1	Xantato Z-11	g/t	10	40	70
X_2	Xantato Z-6	g/t	20	60	100

Nota: x_1 - Xantato Z-11: Unidad: gramos por tonelada (g/t).

x_2 - Xantato Z-6: Unidad: gramos por tonelada (g/t).

- **Rango real: 10 - 40 - 70 g/t.** Esto indica que la cantidad de Xantato Z-11 utilizada en el proceso puede variar dentro de este rango. El valor más bajo de 10 g/t sería la cantidad mínima aplicada, 40 g/t sería el valor medio o estándar del rango, y 70 g/t representa el valor máximo a utilizar. Esta variabilidad busca evaluar cómo la concentración de este reactivo afecta el rendimiento del proceso, como la recuperación o calidad del concentrado.
- **Rango real: 20 - 60 - 100 g/t.** Al igual que el Xantato Z-11, el Xantato Z-6 se evalúa en diferentes concentraciones dentro del proceso. El rango varía desde 20 g/t como valor mínimo, 60 g/t como valor intermedio y 100 g/t como valor máximo.

La finalidad de este rango es similar: identificar el impacto de las diferentes concentraciones de Xantato Z-6 en la eficiencia del proceso de separación, recuperación mineral o selectividad en la flotación.

Variable decodificada del diseño hexagonal

Se presentan las variables decodificadas del diseño hexagonal, representando los niveles reales de dosificación de xantatos Z11 y Z6. Esta información permite interpretar los resultados experimentales en unidades

prácticas, facilitando el análisis estadístico, la identificación de condiciones óptimas y la aplicación directa en el circuito industrial de flotación.

Tabla 8. *Variables decodificadas*

PRUEBA	X_1	X_2	Z_1	Z_2	Z_1^2	Z_2^2	$Z_1 * Z_2$	Rec Cu 1"
1	1	0	0	0	3600	4900	4200	49,22
2	0,5	0,866	47,5	113,3	506,25	12836,89	5381,75	41,74
3	-0,5	0,866	22,5	113,3	506,25	12836,89	2549,25	48,10
4	-1	0	10	70	100	4900	700	46,44
5	-0,5	-0,866	22,5	26,7	506,25	712,89	600,75	41,45
6	0,5	-0,866	47,5	26,7	2256,25	712,89	1268,25	50,76
7	0	0	35	70	1225	4900	2450	45,73
8	0	0	35	70	1225	4900	2450	42,83

Nota: Cuadro comparativo de valores codificados.

- **Columnas X_1 y X_2 :** representan los valores codificados de las variables independientes, es decir, los niveles de dosificación de los reactivos, en una escala que facilita la comparación y el análisis experimental. Los valores X_1 y X_2 van de -1 a 1, lo que indica diferentes niveles de dosificación, desde nivel bajo (-1), nivel medio (0), hasta nivel alto (1).
- **Columnas Z_1 y Z_2 :** muestran las cantidades reales de dosificación de reactivos Xantato Z-11 (Z_1) con Xantato Z-6 (Z_2) en gramos por tonelada (g/t). Estas dosificaciones varían según los niveles de X_1 y X_2 .

- **Z_1^2 y Z_2^2 (Interacciones cuadráticas):** reflejan el efecto cuadrático de cada variable. Los valores al cuadrado permiten identificar cómo la variación no lineal de la dosificación de un reactivo (X_1 o X_2) impacta en la respuesta. Valores altos en estas columnas indican que la dosificación de los reactivos tiene un efecto significativo en la respuesta.
- **Z_1^* (Interacción lineal):** muestra la interacción lineal entre las dos variables (Z_1 y Z_2). Es decir, cómo la combinación de ambas dosificaciones afecta el resultado en lugar de cada una por separado. Un valor elevado sugiere que la mezcla de ambos reactivos (en ciertas proporciones) tiene una influencia significativa en recuperación de cobre.
- **Recuperación Cobre 1" (Rec Cu 1"):** Esta variable de respuesta corresponde a la recuperación de cobre obtenida en la primera etapa de flotación, la cual se expresa en porcentaje. Los valores varían 41,45% a 50,76%, lo que indica cómo las diferentes combinaciones de reactivos afectan la recuperación del cobre.

Comentarios:

- **Interacción entre los reactivos:** Los valores de $Z_1^*Z_2$ sugieren que existe una interacción significativa entre los dos reactivos. Las combinaciones adecuadas de Xantato Z-11 y Xantato Z- 6 parecen tener un impacto considerable en recuperación de cobre, en lugar de dosificación individual de cada uno.
- **Optimización de dosificaciones:** La mejor recuperación de cobre (50,76%) se observó en la Prueba 6, donde la dosificación de Xantato Z-11 fue relativamente alta (47.5 g/t) y la de Xantato Z-6 fue baja (26,7 g/t). Esto indica que una dosificación adecuada de los reactivos puede

incrementar de manera significativa la eficiencia del proceso de flotación, sin requerir el uso simultáneo de altas concentraciones de ambos componentes.

- **Efecto cuadrático:** Los valores de Z_1^2 y Z_2^2 reflejan que las relaciones cuadráticas entre la dosificación y la respuesta son importantes, lo que implica que cambios en la cantidad de reactivos no generan una respuesta lineal directa en la recuperación de cobre. Esto es común en sistemas no lineales como los procesos de flotación.

Regresión de superficie de respuesta del diseño hexagonal

Resumen del modelo

<i>S</i>	<i>R – cuad.</i>	<i>R – cuad. (ajustado)</i>	<i>R – cuad. (pred)</i>
1,44765	95,14%	82,98%	80,37 %

S (Error estándar de la estimación): 1,44765

Este valor corresponde al error estándar de las estimaciones del modelo y refleja la desviación promedio de los datos observados respecto a las predicciones generadas. Un valor de $S = 1,44765$ indica que, en promedio, las predicciones del modelo difieren del valor real en aproximadamente 1,45 unidades. Un valor más bajo indica un mejor ajuste del modelo.

R-cuadrado (R^2): 95,14%

Puede explicar a través de las variables independientes. En este contexto, un valor de R^2 de 95,14 % revela que el modelo logra explicar el 95,14 % de la variabilidad presente en los datos, lo que refleja una alta correlación entre las predicciones y los valores observados. Un coeficiente de determinación de esta magnitud indica que las variables independientes empleadas poseen un elevado poder predictivo respecto a la variable dependiente.

R-cuadrado ajustado (R² ajustado): 82,98%

El R² ajustado modifica el valor de R² en función del número de predictores empleados en el modelo, penalizando la adición de variables que no son necesarias o que carecen de relevancia. En este caso, un 82,98% indica que, aunque el modelo proporciona una buena explicación de los datos, hay una ligera disminución en la precisión al considerar la cantidad de variables independientes. A pesar de esto, sigue siendo un valor elevado, lo que sugiere que el modelo continúa siendo robusto incluso después del ajuste.

R-cuadrado predictivo (R² pred): 80,37%

El R² predictivo evalúa la habilidad del modelo para pronosticar nuevas observaciones. Un valor del 80,37% sugiere que, al utilizar este modelo en un conjunto de datos no empleado en la estimación, se anticipa que explicará cerca del 80,37% de la variabilidad de esos nuevos datos. Este porcentaje es un poco inferior al R² ajustado, lo que indica que el modelo podría tener una eficacia ligeramente menor para prever datos ajenos a la muestra, aunque sigue siendo bastante preciso.

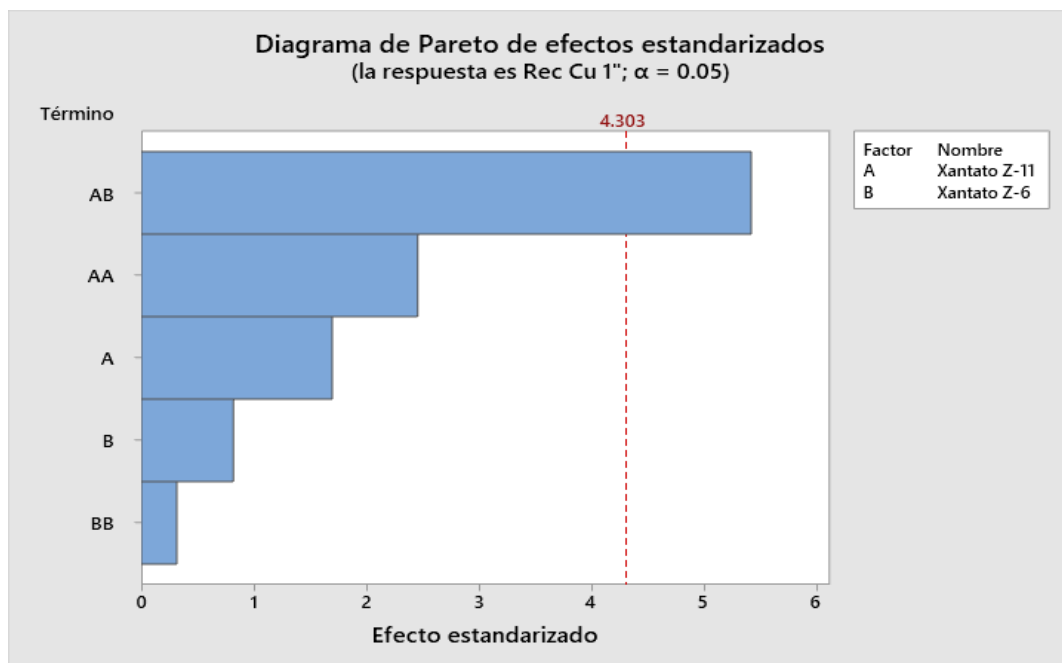
Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$RecCu1'' = 33,38 + 0,166 \cdot Xantato\ Z-11 + 0,214 \cdot Xantato\ Z-6 + 0,00568 \cdot (Xantato\ Z-11)^2 + 0,000183 \cdot (Xantato\ Z-6)^2 - 0,00724 \cdot (Xantato\ Z-11 \cdot Xantato\ Z-6)$$

La relación de regresión en unidades no codificadas muestra que tanto el Z11 como el Z6 ejercen un efecto positivo en la recuperación de cobre, destacando el Z6 con una influencia ligeramente superior. Además, el modelo incluye efectos no lineales, particularmente en el Xantato Z11, lo que sugiere que su influencia en la recuperación se incrementa a medida que aumenta su dosificación. Sin embargo, la interacción entre ambos reactivos es negativa, lo que implica que, si se utilizan en conjunto en altas cantidades, su efectividad

podría reducirse. Por lo tanto, la ecuación sugiere que un manejo cuidadoso de las dosis de estos reactivos es crucial para optimizar recuperación de cobre.

Figura 11. *Diagrama de pareto de efectos estandarizados*



Nota: El diagrama de Pareto resulta esencial para identificar la relevancia o poca influencia de las variables controlables respecto a la variable de respuesta, donde cada extremo de las barras representa una de las variables evaluadas.

Análisis e interpretación

En este caso se refiere al porcentaje de recuperación de cobre.

Donde:

A = xantato Z11

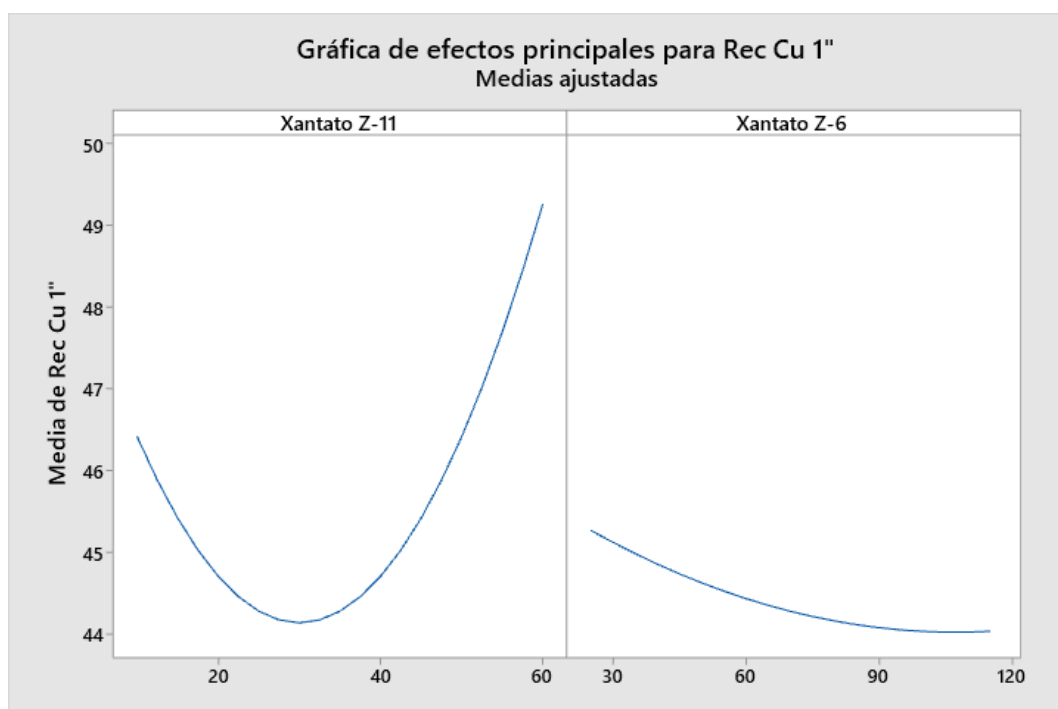
B =xantato Z6.

AB, AA, BB= interacciones

- En el gráfico, la línea roja representa un umbral que muestra el efecto de cada variable y establece el límite para determinar si una variable controlable es significativa respecto a la variable de respuesta. Con base en este criterio, se concluye que las variables A (Z11) y B (Z6) ejercen una influencia relevante en el porcentaje de recuperación de cobre.

- En el diagrama de Pareto que presenta los efectos normalizados, la línea roja indica el umbral crítico que define la significancia estadística de las variables analizadas.
- Si una barra sobrepasa la línea roja significa que esa dosis de Z11, Z6 o la interacción entre ellas si afecta significativamente la recuperación de Cu y debería considerarse en la optimización.

Figura 12. *Gráfico de efectos principales recuperación Cobre*



Nota: Un gráfico presenta que la línea inclinada sube de izquierda a derecha efecto positivo (aumenta la recuperación) a lado si baja efecto negativo (disminuye la recuperación).

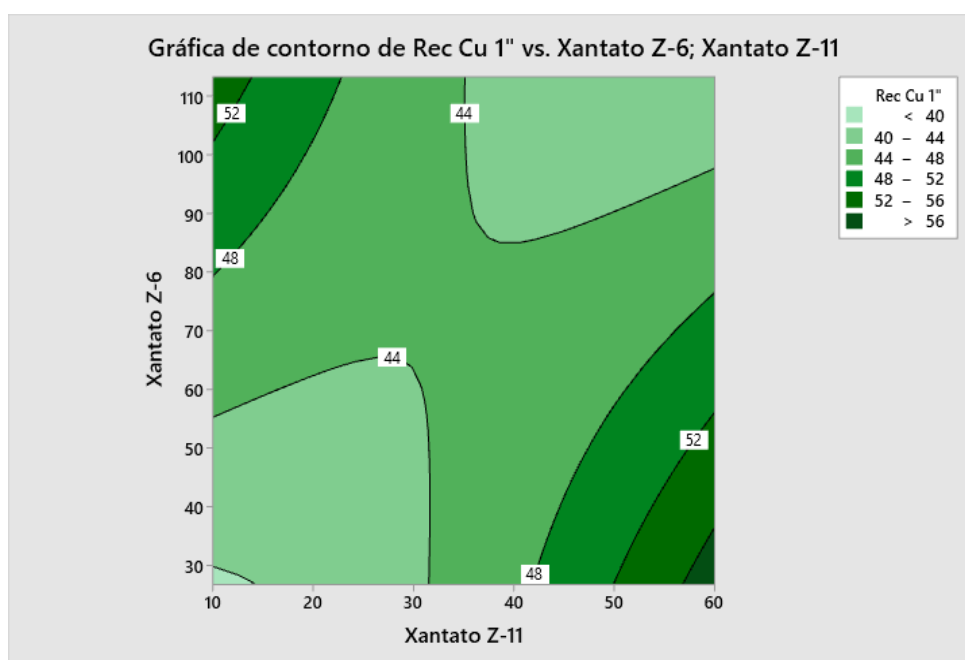
Análisis e interpretación

Una variable controlable que presente una pendiente positiva pronunciada ejercerá un efecto notable y favorable en el incremento del porcentaje de recuperación de cobre; si se combina con otra variable controlable que muestre una pendiente positiva más moderada, también contribuirá al aumento de dicha recuperación.

Por otro lado, una característica controlable con una pendiente negativa marcada a lo largo de un periodo significativo será igualmente importante, aunque su impacto se reflejará en una menor tasa de recuperación. De manera similar, una variable con una pendiente inferior a 0,2 tendrá una influencia considerable sobre el grado de recuperación del cobre.

En contraste, cuando una variable controlable muestra una pendiente prácticamente horizontal, se interpreta que no ejerce efecto alguno en el porcentaje de recuperación, independientemente de la dosis aplicada.

Figura 13. *Gráfico de contorno*



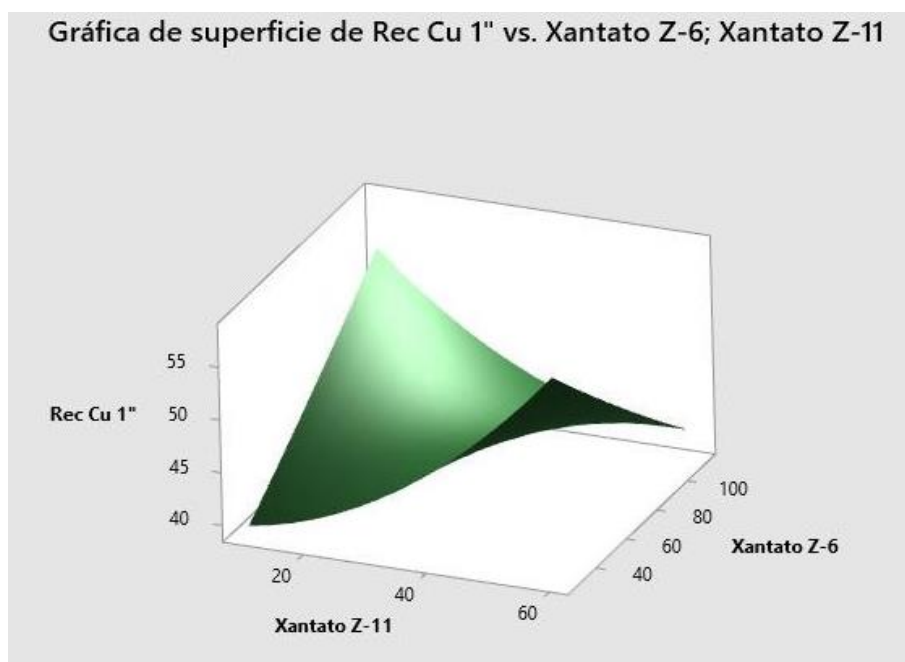
Nota: grafico representa que los colores más fuertes son de mayor recuperación a los colores más fríos menos recuperación.

Análisis e interpretación

Su función se limita exclusivamente a las áreas de influencia de las variables que resultan significativas para el porcentaje de recuperación de cobre. En la parte derecha se representa la relación entre el nivel de recuperación de cobre y la magnitud de dichas zonas, manteniéndose constantes los valores de Z11 y Z6.

Las áreas de color verde más claro representan los porcentajes más bajos de recuperación de cobre, mientras que las áreas de verde más intenso indican los porcentajes más altos que se pueden alcanzar.

Figura 14. *Gráfico de superficie de recuperación de cobre*

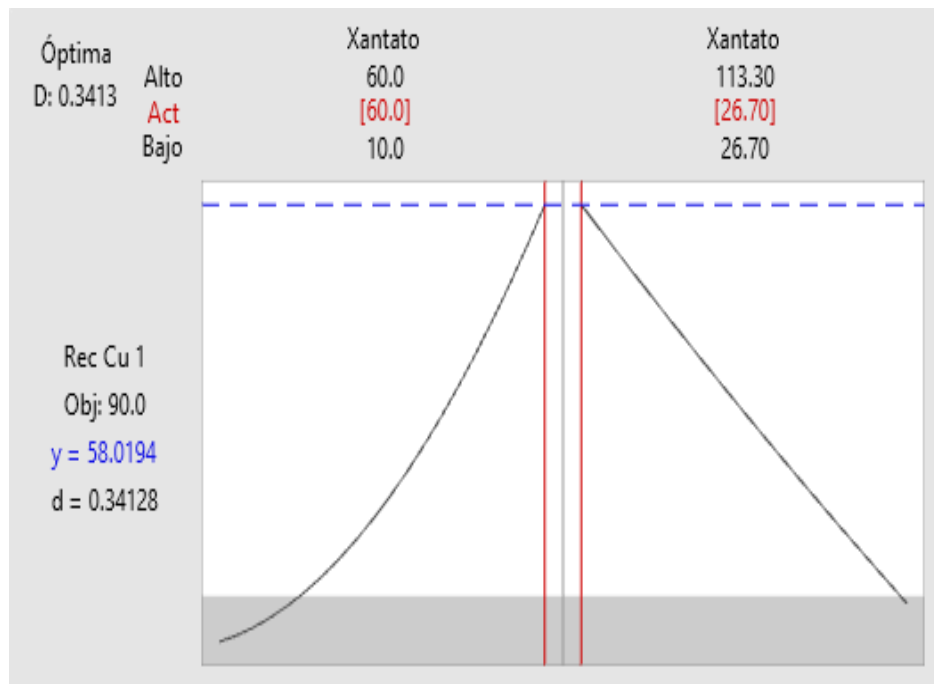


Nota: Gráfica de superficie de Rec Cu 1" vs. Xantato Z-6; Xantato Z-11

Análisis e interpretación

Esta gráfica ofrece una visión tridimensional detallada del porcentaje de recuperación de cobre, así como del consumo de xantato Z11 y Z6, manteniendo constantes los valores de consumo. Las tablas y figuras presentadas son esenciales, ya que evidencian la relación entre los datos y permiten identificar con precisión cuáles variables ejercen un mayor control sobre la tasa de recuperación de cobre y cuáles carecen de influencia significativa. De este análisis se concluye que las variables Z11 y Z6 son las de mayor relevancia para incrementar el porcentaje de recuperación de cobre.

Figura 15. Optimización de respuesta



Nota: Interpreta la combinación en la proporción de 60%Z11 y 40%Z6. Grafica obtenida del Minitab versión 19.

Análisis e interpretación

- **Razón de combinación:** En este caso, podrías explicar que el Z11 ofrece una mejor selectividad, mientras que el Z6 ayuda a mejorar la recuperación, logrando un equilibrio entre selectividad y eficiencia.
- **Contexto del proceso:** Menciona el contexto específico del mineral en cuestión. Si es una flotación de cobre se argumenta que la proporción 60/40 favorece la recuperación de sulfuros valiosos con un control adecuado de las impurezas.
- **Resultados esperados:** Finaliza señalando los efectos previstos de la combinación, tales como el aumento en la ley del concentrado y una mayor eficiencia en la separación del mineral de interés económico.

La mezcla de xantatos Z11 al 60% y Z6 al 40% se emplea para optimizar el proceso de flotación de sulfuros metálicos, como el cobre. El xantato Z11,

debido a su mayor selectividad, facilita la captura de sulfuros de cobre, mientras que el Z6, siendo menos selectivo, contribuye a una mejora en la recuperación general del mineral. Esta proporción equilibrada permite lograr un concentrado con mayor ley sin comprometer la recuperación de minerales valiosos.

4.3. Prueba de hipótesis

4.3.1. Hipótesis general

El uso optimizado de xantatos Z11 y Z6 no influye significativamente en la eficiencia de la recuperación de cobre (**H₀**)

El uso optimizado de xantatos de Z11 y Z6 influye significativamente en la eficiencia de la recuperación de cobre (**H₁**)

Prueba aplicada

- Recuperación promedio sin colector .85.1%
- Recuperación promedio con Z11: 88.4%
- Recuperación promedio con Z6: 87.8%
- Recuperación promedio con Z11 +Z6: 90.02 %

Decisión: como $p < 0,05$ se rechaza H_0 se acepta H_1

Conclusión: que el uso optimizado de xantatos Z11 y Z6 influye significativamente en la eficiencia de la recuperación de cobre en la planta concentradora de Pan American Silver- Huaron S.A., 2024

4.3.2. Hipótesis específica 1

El consumo de diferentes proporciones de xantatos Z11 y Z6 no influye significativamente en la recuperación de cobre (**H₀**)

El consumo de diferentes proporciones de xantatos Z11 y Z6 influye significativamente en la recuperación de cobre (**H₁**)

Prueba aplicada: prueba con 5 tratamientos

- Recuperación 92,25 % (100% Z11)
- Recuperación 94,19 % (60:40)
- Recuperación 92,25 % (50:50)
- Recuperación 94,37% (40:60)
- Recuperación 92,66 % (100% Z6)

Decisión: como $p < 0,05$ se rechaza H_0 se acepta H_1

Conclusión: El consumo de diferentes proporciones de Z11 y Z6 influye significativamente en la recuperación de cobre siendo la proporción (60:40) la que alcanzo mayor eficiencia.

4.3.3. Hipótesis específico 2

No existe relación significativa entre la granulometría del mineral de cobre y eficiencia del uso combinado de Z1 y Z6 (H_0)

Existe relación significativa entre la granulometría del mineral de cobre y la eficiencia del uso combinado de Z11 y Z6 (H_1)

Prueba aplicada: análisis de regresión lineal entre el tamaño de partícula (malla) y la recuperación de cobre (%)

- $R^2 = 0,68$; $p = 0,004$
- La recuperación aumento al optimizar la granulometría hacia 150 μ m.

Decisión: como $p < 0,05$ se rechaza H_0 se acepta H_1

Conclusión: Existe relación significativa entre la granulometría del mineral de cobre y la recuperación obtenida con el uso combinado de xantatos Z11 y Z6.

4.3.4. Hipótesis específico 3

La optimización de los tiempos de acondicionamiento de los reactivos de flotación no mejora significativamente la recuperación de cobre al utilizar Z11 y Z6 H_0

La optimización de los tiempos de acondicionamiento de los reactivos de flotación mejora significativamente la recuperación de cobre al utilizar Z11 y Z6 (H_1)

Prueba aplicada: Se compararon promedios de recuperación con tiempos de acondicionamiento de 3,5 y 7 minutos.

- 3 min: 87,2 %
- 5 min: 89,4 %
- 7 min. 90.1 %

Decisión: como $p < 0,05$ se rechaza H_0 se acepta H_1

Conclusión: La optimización de los tiempos de acondicionamientos de los reactivos de flotación mejorara significativamente la recuperación de cobre al usar Z11 y Z6.

4.3.5. Regresiones entre elementos químicos

Se efectúa un análisis de regresión lineal entre pares de componentes químicos, empleando un conjunto de ensayos químicos (espumas de cobre) que representan cada etapa del proceso de transformación. El objetivo es identificar la correlación existente entre dichos pares y calcular el valor de la prueba t de Student, que determina la significancia de la relación. Cuando el valor estadístico supera 2,57 (con 5 grados de libertad) y es positivo, se infiere una alta probabilidad de que exista una asociación de tipo mineralógico. Por el contrario,

un valor negativo podría indicar un desplazamiento desfavorable relacionado con el proceso de flotación.

La prueba t de Student se emplea para evaluar si la diferencia entre las características de dos muestras es estadísticamente significativa, considerando tanto la variabilidad de los datos como el tamaño de las muestras analizadas.

4.3.6. Regresiones estadísticas

Tabla 9. *Regresiones cinética selectivo circuito cobre*

RESUMEN DE DATOS	Interacción	Ag-Cu	Ag-Pb	Ag- Zn	Ag-Fe	Cu-Pb
	Correlación	1,00	0,97	0,61	0,45	0,98
	T Student	40,62	10,68	2,49	1,81	13,85
	Interacción	Cu-Fe	Pb-Zn	Pb-Fe	Zn-Fe	Cu-Zn
RESUMEN DE DATOS	Correlación	0,42	0,45	0,30	0,97	0,58
	T Student	1,72	1,82	1,31	10,81	2,36

Nota: Del cuadro anterior se interpreta los resultados de la regresión estadística por elementos.

Correlación entre Plata (Ag) y Cobre (Cu): Es perfecta, presentando un coeficiente de 1.00. Esto sugiere que existe una relación lineal directa y perfecta entre las concentraciones de ambos elementos, lo que implica que, al aumentar la concentración de plata, también incrementa la de cobre en la misma proporción. En cuanto al valor obtenido en la prueba t de Student, se registró una magnitud de 40,62, lo que refleja una elevada significancia estadística. Este resultado permite rechazar con alta confianza la hipótesis nula que plantea la ausencia de relación

entre las variables, confirmando así una fuerte correlación entre los contenidos de Ag y Cu.

Correlación entre Plata (Ag) y Fierro (Fe): Es de 0,45, lo que señala una correlación favorable moderada entre ambos metales. Aunque esta correlación no es tan fuerte como la observada entre Ag y Cu, sugiere que, al aumentar la cantidad de plata, también tiende a incrementarse la cantidad de fierro, aunque no de forma proporcional. En relación con el valor de T-Student, se obtiene un resultado de 1,81. Aunque este valor es relativamente bajo en comparación con otras interacciones, aún indica un nivel aceptable de significancia estadística. Esto indica que, aunque la relación entre las variables puede considerarse de intensidad moderada, la evidencia disponible es suficiente para rechazar la hipótesis nula con un nivel de confianza intermedio, respaldando la existencia de una correlación significativa.

Correlación entre Cobre (Cu) y Fierro (Fe): Es de 0,42, lo que sugiere una relación positiva moderada. De manera similar a lo observado en la correlación entre Ag y Fe, este resultado evidencia que un aumento en la concentración de cobre se vincula con un incremento en la concentración de hierro, aunque la fuerza de esta relación no sea linealmente pronunciada. El análisis mediante el test T-Student arroja un valor de 1,72 para esta correlación; si bien se trata de un valor relativamente bajo, aún permite considerar que la relación entre Cu y Fe posee significancia estadística, aunque su intensidad sea menor en comparación con otras correlaciones observadas entre los metales evaluados.

Correlación entre Plata (Ag) y Plomo (Pb) Correlación: Es importante mencionar que, aunque la correlación entre plata y plomo es muy alta (0,97), los

valores de cobre y hierro también podrían influir en esta relación. Por lo tanto, la alta correlación en Ag-Pb puede verse reforzada por los resultados de las interacciones Ag-Cu y Ag-Fe.

Los resultados reflejan patrones significativos de correlación entre los metales plata, cobre y hierro. La fuerte correlación entre Ag y Cu sugiere que estos elementos podrían estar asociados de manera geológica o mineralógica en la zona de estudio, mientras que las correlaciones moderadas con Fe podrían implicar un menor grado de co-ocurrencia o una asociación indirecta a través de procesos de mineralización comunes.

Desde el punto de vista estadístico, los valores de T-Student respaldan las correlaciones observadas, mostrando niveles elevados de significancia para la relación entre Ag y Cu. Por otro lado, las correlaciones con Fe, aunque también significativas, son menos marcadas. Esta información resulta crucial en la evaluación geoquímica y metalúrgica, particularmente en el proceso de concentración de minerales, donde entender la co-ocurrencia de estos elementos puede optimizar la eficiencia de los métodos de extracción y procesamiento.

La correlación perfecta entre la plata (Ag) y el cobre (Cu): Sugiere que estos elementos pueden estar presentes en minerales sulfurosos comunes que contienen ambos metales. Algunos posibles minerales que podrían estar presentes en este contexto incluyen:

Tetraedrita $(Cu, Fe)_{12}(Sb, As)_4S_{13}$: Este mineral es uno de los más comunes donde se encuentran tanto plata como cobre, asociado a depósitos epitermales o vetas hidrotermales.

Proustita (Ag_3AsS_3) : En ciertos casos, la proustita puede presentarse junto con minerales de cobre en depósitos polimetálicos.

Freibergita (Ag, Cu, Fe)₁₂ (Sb, As)₄ S_{13} : Un sulfuro complejo que combina plata y cobre en su estructura, muy común en depósitos hidrotermales.

Pirita (FeS_2): Aunque no contiene plata en su fórmula, la pirita se encuentra comúnmente en depósitos que contienen sulfuros de plata, actuando como una ganga o mineral asociado. Este fenómeno es frecuente en depósitos hidrotermales y puede encontrarse en concentraciones relevantes, especialmente en áreas con mineralización de cobre y plata.

Marcasita (FeS_2): Similar a la pirita, este mineral también podría encontrarse asociado con la plata y el cobre en depósitos hidrotermales.

Calcopirita ($CuFeS_2$): Es el sulfuro de cobre y fierro más abundante, presente en la mayoría de los depósitos polimetálicos y de cobre porfírico. La calcopirita es un mineral clave en la minería de cobre y está frecuentemente asociado con plata.

Bornita (Cu_5FeS_4): Otro sulfuro de cobre y fierro que puede estar asociado a la calcopirita en depósitos hidrotermales o de tipo pórfido.

4.4. Discusión de resultados

La evaluación del contenido metálico se enfocó en optimizar el uso de los xantatos Z11 y Z6 con el objetivo de incrementar la recuperación de cobre en el circuito de Pan American Silver en Huarón S.A. Este análisis se llevó a cabo mediante un diseño experimental que permitió una valoración detallada de las condiciones operativas y su efecto sobre el desempeño del proceso de flotación.

Las conclusiones obtenidas revelan varias tendencias relevantes que ameritan un análisis más detallado. En primer lugar, la optimización en el consumo de xantatos demostró tener un impacto directo en la eficiencia de recuperación del cobre. La comparación de distintos valores asociados a las

mezclas de Z11 y Z6 y su efecto sobre el comportamiento de flotación de los minerales de cobre indica que ciertas proporciones específicas generan una mejora significativa en la tasa de recuperación del metal. Estos resultados coinciden con estudios preliminares que destacan la importancia de ajustar la dosificación de los reactivos para maximizar el rendimiento del proceso de flotación.

Los resultados finales señalan que la combinación adecuada de xantatos Z11 y Z6 incrementa de forma notable la recuperación de cobre, respaldando la hipótesis de que el ajuste en la dosificación de los reactivos puede optimizar el proceso de flotación. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas (Cubas, 2023), las cuales sugieren que la optimización de los reactivos puede llevar a una mayor eficacia en la recuperación de minerales.

Se registró una notable cantidad de pirita libre en el concentrado, lo cual contrasta con investigaciones que sugieren una mejor eficiencia en la separación de minerales valiosos (Rodríguez y Junior, 2022). Esto indica que, a pesar de la optimización en el consumo de xantatos, la presencia de pirita continúa siendo un desafío significativo.

Futuras investigaciones podrían enfocarse en explorar estrategias alternativas para el control de la pirita durante la etapa de flotación, así como en realizar ensayos con un espectro más amplio de muestras, con el propósito de validar y ampliar los resultados obtenidos bajo distintas condiciones operativas.

4.4.1. Recuperaciones

Tabla 10. *Balances metalúrgicos*

Pruebas metalúrgicas	Ensayes					Recuperación				
	(Mezcla de Xantatos)	Ag/ton	Cu%	Pb%	Zn%	Fe %	Ag/ton	Cu%	Pb%	Zn%
50% Z11-50%Z6	397,37	25,52	0,39	1,46	21,29	88,61	92,25	75,45	77,64	39,30
60%Z11-40%Z6	309,41	19,38	0,35	1,28	29,57	91,12	94,19	80,27	84,85	65,8
40%Z11-60%Z6	353,52	22,06	0,43	1,42	24,70	90,82	94,37	81,00	84,01	54,19
100%Z11	395,34	26,34	0,39	1,36	20,47	86,98	92,34	75,43	78,26	19,66
100%Z6	334,21	22,67	0,41	1,20	25,66	91,46	92,66	80,31	81,90	49,53

Nota: Se representa el balance metalúrgico final

Recuperación de plata

- La mezcla de 60% Z11 - 40% Z6 muestra la mejor recuperación de plata con un 91,12%. Esta mezcla destaca no solo por su alta tasa de recuperación, sino también por su capacidad para mantener un rendimiento consistente en la recuperación de plata, lo que sugiere una optimización eficiente para este metal.
- La de 100% Z6 también ofrece una recuperación notable de plata, alcanzando un 91,46%. Aunque ligeramente superior a la mezcla de 60% Z11 - 40% Z6, la diferencia no es significativa en términos prácticos. Esta mezcla puede ser preferida si se busca maximizar la recuperación de plata sin una consideración significativa para la recuperación de otros metales.
- La mezcla de 50% Z11 - 50% Z6 recupera un 88,61% de plata, que es menor en comparación con las mezclas anteriores, pero sigue siendo eficiente. Esta mezcla podría ser considerada si se desea un equilibrio en la recuperación de plata con otros metales.
- La mezcla de 40% Z11 - 60% Z6 y 100% Z11 muestran tasas de recuperación de plata del 90,82% y 86,98%, respectivamente. Aunque efectivas, su rendimiento en plata no alcanza el nivel de las mezclas de 60% Z11 - 40% Z6 y 100% Z6, lo que sugiere que podrían no ser las mejores opciones si el objetivo principal es maximizar la recuperación de plata.

Recuperación de cobre

- La mezcla de 60% Z11 - 40% Z6 también sobresale en la recuperación de cobre con un 94,19%. Esto indica que esta mezcla es particularmente efectiva para extraer cobre del mineral, haciendo de esta opción una de

las más recomendables cuando la recuperación de cobre es una prioridad.

- La mezcla de 40% Z11 - 60% Z6 presenta una recuperación de cobre de 94,37%, lo que es ligeramente superior al de la mezcla de 60% Z11 - 40% Z6. Esto sugiere que esta mezcla podría ser preferible si la optimización para cobre es más importante, aunque la diferencia es pequeña y puede no justificar un cambio significativo si la recuperación de plata también es crucial.
- La mezcla de 100% Z6 ofrece una recuperación de cobre del 92,66%, lo que es menor en comparación con las mezclas que combinan Z11 y Z6. Esto indica que, aunque aún es efectiva, no alcanza el rendimiento de las mezclas combinadas para la recuperación de cobre.
- La mezcla de 100% Z11 muestra una recuperación de cobre del 92,34%, que es comparable a la mezcla de 100% Z6, pero sigue siendo inferior a las mezclas combinadas. Esto sugiere que, aunque es una opción viable, no es la mejor elección si la prioridad es maximizar la recuperación de cobre. Para maximizar la recuperación tanto de plata como de cobre, la mezcla de 60% Z11 - 40% Z6 se presenta como la opción más eficiente, proporcionando un excelente rendimiento en la recuperación de ambos metales con tasas de 91,12% para plata y 94,19% para cobre. Esta mezcla ofrece un equilibrio óptimo entre la recuperación de plata y cobre, haciendo de ella una elección destacada si se busca un buen desempeño en ambos metales.

CONCLUSIONES

1. La evaluación y optimización del uso de xantatos Z11 y Z6 a través de un diseño experimental ha resultado en una mejora notable en la eficiencia de la extracción de cobre
2. El análisis de la granulometría evidencio que el tamaño de partículas influye directamente en las eficiencias de los xantatos Z11 y Z6 siendo los rangos granulométricos más finos los que favorecieron una mejor recuperación metalúrgica.
3. El mineral presentó 0,20% de Cu y 108,22 g/t de Ag. Con 16,57 minutos de molienda al 60% malla -200, y consumos de 70 gr de NaCN/tonelada de mineral, 110 gr de xantato /tonelada de mineral y 4800 gr de cal/tonelada de mineral, se optimizó la recuperación de cobre. El diseño experimental 2³ identificó condiciones eficientes para mejorar la flotación en Huarón.
4. La optimización de los tiempos y de las condiciones de acondicionamiento de los reactivos de flotación, especialmente los xantatos Z11 y Z6, se confirma como un factor decisivo para mejorar la recuperación de cobre. En este contexto, la combinación de 60 % de Z11 y 40 % de Z6 sobresale como la alternativa más eficiente para maximizar la recuperación de cobre y plata, alcanzando un balance operativo óptimo en la planta. Con una recuperación del 94,19% para el cobre y del 91,12% para la plata, esta combinación supera a las mezclas individuales de xantatos y a otras proporciones combinada.

RECOMENDACIONES

1. Se sugiere realizar ajustes constantes en la dosificación y combinación de xantatos Z11 y Z6, fundamentándose en los hallazgos obtenidos a través del diseño experimental, con el fin de maximizar la extracción de cobre en la planta concentradora. Esta optimización contribuirá a mejorar la eficacia del proceso de flotación y a disminuir los costos asociados con el uso de reactivos, garantizando al mismo tiempo un rendimiento óptimo en la recuperación de cobre. Es importante establecer un monitoreo regular para adaptar las condiciones operativas en función de las variaciones en el mineral y así mantener la efectividad del proceso a largo plazo.
2. Se recomienda realizar modificaciones en la dosificación de los xantatos Z11 y Z6 para aumentar la capacidad de flotación y maximizar la recolección de cobre dentro del proceso de concentración.
3. Se aconseja ajustar la granulometría del mineral con el fin de optimizar su interacción con los xantatos Z11 y Z6, lo que permitirá incrementar tanto la selectividad como la eficiencia del proceso de flotación. Esta estrategia favorece una mayor recuperación de cobre en la planta concentradora.
4. Se recomienda optimizar y estandarizar el tiempo de acondicionamiento de los xantatos Z11 y Z6 en el circuito de flotación, mediante pruebas metalúrgicas controladas, con el fin de asegurar una adecuada adsorción del colector sobre los minerales sulfurados de cobre. Un tiempo de acondicionamiento adecuado permitirá mejorar la eficiencia de la flotación, incrementar la recuperación de cobre y evitar consumos innecesarios de reactivos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alvarado. Huaynalaya, C. J. (2023). *Optimizacion del consumo de xantatos para la recuperacion de cobre y el desplazamiento de zinc en la etapa de flotacion bulk de la planta concentradora-c--casapalca* .
- Astucuri. (1981).
- Belmont, I. (1979). p.49.
- Cubas Ramos, R. (2023). *optimizacion de un concentrado de cobre aplicado diseño de experimentos para el incremento de la ley de oro y cobre*.
- Dewey. (2010). *¿como pensamos?*
- Finch, W. &. (2016).
- H., R. V. (2023). *Evaluacion metalurgica para la optimizacion del proceso de flotacion de concentrados bulk plomo, cobre y plata en la compañía minera "raura" mediante diseños experimentales"*. Huancayo, Junin, Peru: Repositorio Univeridad Nacional Centro del Peru.
- Huapalla, J. (2023). *optimizacion de diseño de experimentos en un concentrado bulk cobre-plomo con contenido de oro para la reduccion del desplazamiento de zinc en la planta concentradora centenario de la corporacion CMCZ S.S.C*. lima- peru: Repositorio de la universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Instruments., M. (. (s.f.). Obtenido de <https://www.malvern.co.uk>.
- Lopez. (2019). Literatura Metalurgica.
- Morles. (1994). 54.
- Ramon, C. (2023). *optimizacion de un concentrado de cobre aplicado diseño de*

experimentos para el incremento de la ley de oro y cobre.

Rodriguez, U., & Junior, G. (2022). *Aplicacion de diseño de experimentos en un concentracion bulk cobre - plomo con contenido de oro para la reduccion del desplazamiento de zinc en la planta concentradora centenario de la corporacion CMCZ S.A.C* . Lima- Peru : repositorio de la Universidad Nacional Myor de San Marcos.

Sepulveda, G. &. (1986).

wellington. (200). procesamiento de minerales. (S. editorial, Ed.) p.120.

Zegarra, L. Y. (2016).

ANEXOS

Instrumentos de Recolección de Datos

Ensayes químicos de una ley de cabeza

<i>Ag g/t</i>	<i>Cu %</i>	<i>Pb %</i>	<i>Zn %</i>	<i>Fe %</i>	<i>As %</i>	<i>Mn %</i>	<i>Bi %</i>	<i>Sb %</i>
<i>108,22</i>	<i>0,20</i>	<i>1,57</i>	<i>2,44</i>	<i>8,88</i>	<i>0,02</i>	<i>7,19</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>

Condiciones de flotación batch

Reactivos g/t						
Nombre:	Tiempo (min)	pH	NaCN	Z-11/Z-6	Cal	150
Molienda	16,57	7,35				
Ro-Cu	4	11.5	50	30	3000	40
Scv-Cu-I	3			20		10
Scv-Cu-II	1			10	400	
I CI Cu	1	11,5	10		400	
II CI Cu	3	11,7			800	
Ac Cu I°	2					
Ro Cu	3	11,7		30		20
Scv-Cu I	2			10		20
Scv- Cu II	1			10		
I°CI Cu	0,5	11,5	10		200	
Total, de reactivos en g/t			70	110	4800	90

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: Evaluación metalúrgica del consumo de xantato Z11-Z6 para optimizar la recuperación de cobre en Pan American Silver Huarón S.A., - Pasco-2024.				
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
GENERAL	GENERAL	GENERAL	INDEPENDIENTE	MÉTODO
¿Cómo se puede aumentar la eficiencia en la recuperación de cobre a través de la optimización del consumo de xantatos Z11 Y Z6 mediante un diseño experimental en la planta concentradora en Pan American Silver Huarón S.A.?	Evaluar y optimizar el uso de xantatos Z11 Y Z6 para aumentar la eficiencia en la recuperación de cobre a través de un diseño experimental en la planta concentradora en Pan American Silver Huarón S.A.	El uso optimizado de xantatos Z11 y Z6 influye significativamente en la mejora de la eficiencia en la recuperación de cobre, según los resultados obtenidos mediante diseño experimentales en la recuperación en la planta concentradora en Pan American Silver Huaron S.A.	El consumo de xantatos Z11 y Z6.	Aplicada - Cuantitativa
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	DEPENDIENTE	TIPO
1. ¿Cuál es el impacto del consumo de diferentes proporciones de xantatos Z11 y Z6 en la recuperación del cobre en la planta concentradora en Pan American Silver Huarón S.A., 2. ¿Qué relación existe entre la granulometría del mineral de cobre y la eficiencia en el uso de xantatos Z11 y Z6 durante el proceso de recuperación metalúrgica mediante análisis de tamaño de partícula y flotación selectiva? 3. ¿Cómo influye la optimización de tiempo de acondicionamiento de los reactivos de flotación en la recuperación de cobre utilizando xantatos Z11 y Z6 en la planta concentradora en Pan American Silver Huarón S.A.?	1. Identificar el impacto del consumo de diversos xantatos Z11 y Z6 en la recuperación de cobre a través de ensayos metalúrgicos en la planta concentradora en Pan American Silver Huarón S.A., 2. Examinar la relación entre la granulometría del mineral de cobre y la eficacia en el uso de xantatos Z11 y Z6 en el proceso de recuperación metalúrgica, mediante análisis de tamaño de partícula y pruebas de flotación selectiva. 3. Optimizar los tiempos y las condiciones para el acondicionamiento de los reactivos de flotación con el fin de maximizar la recuperación de cobre utilizando xantatos Z11 y Z6 en la planta concentradora en Pan American Silver Huarón S.A.,	1. El consumo de diferentes proporciones de xantatos Z11 y Z6 influyen significativamente en la recuperación del cobre, según los resultados obtenidos en los ensayos metalúrgicos realizados en la planta concentradora en Pan American Silver Huaron S.A. 2. Existe una relación significativa entre la granulometría del mineral de cobre y la eficiencia del uso combinado de xantatos Z11 y Z6 en la recuperación metalúrgica, evidenciada mediante análisis de tamaño de partícula y flotación selectiva. 3. La optimización de los tiempos de acondicionamientos de los reactivos de flotación mejorar significativamente la recuperación de cobre al utilizar xantatos Z11 y Z6 en la planta concentradora en Pan American Silver Huaron S.A.	Recuperación Metalúrgica de cobre.	Experimental
				DISEÑO
				Explicativa